

大角速率动调陀螺仪力矩再平衡回路的分析与解耦控制设计

任建新 陈明

西北工业大学 西安市 710072

任卫东

西安市东风机电有限公司 西安市 710075

【摘要】针对仅有一个力矩器的大角速率动调陀螺仪,力矩器线圈必须通以与陀螺仪自转角速率同频率变化的交变电流的特点,分析了采用合成施矩方式的力矩再平衡回路的解耦控制设计原理。根据系统要求,对解耦控制环节、放大校正环节进行了设计。通过系统仿真,验证了解耦控制设计的合理性。

关键词:力矩再平衡回路 合成施矩 解耦控制 系统仿真

中图分类号:TH823

β

The Rebalance Loop Analysis and Decoupling Control Designing of Large Angular velocity DTG with Only One torquer

Ren Jianxin Chen Ming

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Ren Weidong

Xi'an DongFeng Machinery - Electronic Ltd., Xi'an 710075

Abstract: Since there is just one torquer in the DTG with large angular velocity, and the alternating current through the torquer coil must have the same frequency with the spin angular velocity, this paper analyses the decoupling control designing principle of the torque rebalance loop employing the synthetic torquing. According to the system request, the decoupling control element and the amplifying-tuning element in the loop have been designed. By means of the system simulation, the reasonableness of the decoupling control design have been verified.

Key Words: Torque Rebalance Loop, Synthetic Torquing, Decoupling control, System simulation

1 引言

随着惯性技术的不断发展,当前人们主要着眼于光纤陀螺、微结构陀螺等新型器件的研制,但就当前应用最广的动调陀螺仪来说,其兼有精度、可靠性、小型、寿命和成本等综合性能的优点^[1],预计今后10~15年由挠性陀螺、石英摆片加速度计为核心构成的捷联惯测装置及系统仍将占据我国战术导弹等捷联系统的主要市场^[2]。为此,提高陀螺仪的测量范围,努力达到400°/s以上捷联惯导的要求,仍是应重点解决的问题之一。

我们参与研制的大角速率动调陀螺仪,其最大可感测角速率可长时间达到400°/s以上,瞬时可达500°/s以上,完全可满足大机动运载器用捷联惯导系统性能的要求,这对我国惯性技术的发展一定会起到积极的作用。

2 力矩再平衡回路的原理分析

从功能上看,动调陀螺仪属于位置陀螺仪,其测量角位移的范围很小,只适用于平台式惯导系统。对于用于捷联式惯导系统的动调陀螺仪而言,必须设置力矩再平衡回路,使之成为动力调谐速率陀螺仪。

构成陀螺仪力矩再平衡回路的两个主要部件是角度信号传感器和进动力矩器。传统式动力调谐速率陀螺仪,每根轴上均有一对传感器工作于差动状态,一对力矩器在推挽状态下工作,力矩再平衡回路的施矩电流则作为仪表的输出^[3]。

在我们研究的大角速率动调陀螺仪中,角度传感器由位于X轴、Y轴的两对正交的传感器对构成,每对传感器均工作于差动状态。与现有动调速率陀螺仪的根本不同在于,进动力矩器只有一个力矩器线圈及一对扇形永久磁铁,力矩器线圈的轴线与电机轴相一致,采用交流信号施矩,从而可产生较大的进动力矩^[4]。由于转子磁场的交变作用,要使陀螺仪按要求

进动,对力矩器线圈必须通以与转子自转同频率的交流信号,因此其力矩再平衡回路不能采用现有的两个独立交叉控制回路,而是以转子自转角速率为基准,对传感器的输出信号进行合成,根据合成矢量施矩;同时对施矩电流进行分解,作为角速率信号输出。力矩再平衡回路的工作原理如图 1 所示。

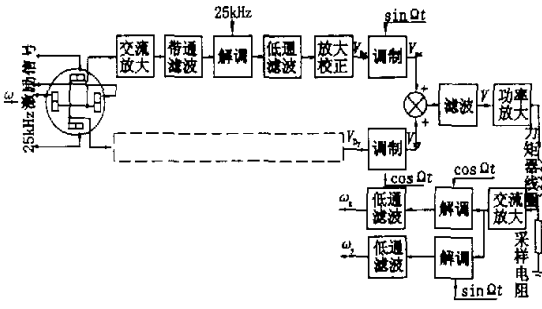


图 1 力矩再平衡回路工作原理图

$$V_{dx} = K\beta, V_{dy} = K\alpha$$

式中: V_{dx} 为角度传感器输出信号经放大校正后的信号电压; α, β 为转子绕 X、Y 轴相对壳体的转角。

$$V_{ux} = V_{dx} \sin \Omega t, V_{uy} = V_{dy} \cos \Omega t$$

式中: V_{ux} 为经转子自转角频率调制后的交流电压信号; Ω 为陀螺仪自转角速率。

$$V = V_{ux} + V_{uy} = V_d \sin(\Omega t + \varphi_0)$$

式中: V 为合成施矩电压信号; $V_d = \sqrt{V_{dx}^2 + V_{dy}^2}$;

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{V_{dx}}{V_{dy}}\right)$$

则施矩电流

$$i = I_d \sin(\Omega t + \varphi_0)$$

$$I_d = V_d / R$$

式中: i 为交流信号; R 为力矩器内部阻抗。

图中的正弦调制信号是取自陀螺电机的信号检测线圈,从而保证了交流施矩信号频率与转子自转角速率相一致,同时确定了陀螺仪力矩器在空间施矩的相位(即虚拟施矩轴方向与陀螺电机信号轴相一致)。为此,在陀螺仪的调试过程中,需转动角度传感器,使其输出的信号经基准调制后合成的信号与力矩作用的相位相一致,只有这样才能保证陀螺仪正常工作。

动力调谐速率陀螺仪是通过传感器、放大校正环节和力矩器而工作于闭环状态的。由于本陀螺仪仅有一个力矩器,以自转角速率为基准,根据传感器输出信号的合成矢量施矩,与传统动调陀螺仪交叉施矩的合成力矩 $M_{x'} = M_x + jM_y$ 施矩,从而用一个力矩器完成了传

统交叉施矩中两个力矩器的作用。

这样,也可以将这种合成施矩看作沿空间两个虚拟轴分别施矩的合成形式。沿空间两个虚拟轴方向的力矩为:

$$\begin{cases} M_x = \frac{1}{2} K_M (I_x - I_x \cos 2\Omega t + I_y \sin 2\Omega t) \\ M_y = \frac{1}{2} K_M (I_y + I_y \cos 2\Omega t + I_x \sin 2\Omega t) \end{cases}$$

式中 K_M 为力矩器的放大倍数。

与传统施矩相比,增加了 2 倍频的交变分量,而此分量并不引起进动作用。

3 力矩再平衡回路解耦控制的实现

图 1 中的 ω 可看作是沿角度传感器两个敏感轴的输入量 ω'_x, ω'_y 的合成矢量,因此动调速率陀螺仪是一个双输入双输出的控制系统。在对现有力矩再平衡回路的仿真与实测中我们发现,系统存在交叉耦合,这主要是由于陀螺仪存在章动交连影响。而在捷联惯导系统中,章动交连效应是产生动态误差的主要因素。

由于解耦可使回路设计简单,转子相对偏角减小,还可增加回路的频带宽度,所以目前的动调速率陀螺仪的力矩再平衡回路通常都采用解耦方案。为了提高陀螺仪的性能指标,对上述力矩再平衡回路进行了解耦控制设计。设计的基本思想十分简单,即将开环传递函数矩阵化为对角矩阵,则闭环传递函数矩阵即成为对角矩阵,从而使每一个输出值只与一个输入值相对应,彼此间消除相互影响。

根据动调陀螺仪力矩再平衡回路的解耦条件:力矩再平衡回路中交叉轴反馈增益与同轴反馈增益的比值,等于陀螺进动与章动力矩系数的比值,可推得解耦环节的传递函数为

$$G(S) = \frac{H}{JS} = \frac{2181}{S}$$

式中: H 为陀螺仪角动量(自转角速率 Ω 为 1200 r/min), $H \approx 0.00578053 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; J 为陀螺横向转动惯量, $J = 0.00000265 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

具有解耦的大角速率动调陀螺仪系统方块图如图 2 所示。

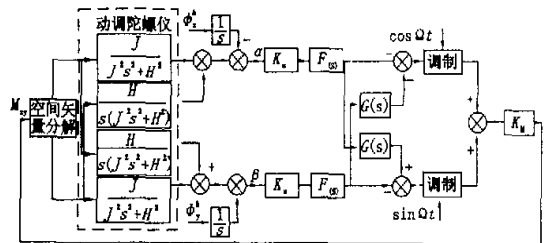


图 2 具有解耦的大角速率动调陀螺仪系统方块图

通过分析,可知合成施矩可近似为沿两个虚拟轴的交叉施矩,那么解耦后的力矩再平衡回路可近似视为输入与输出具有一一对应关系的系统。由图 2,就可以得到图 3 所示解耦后的一条等效力矩再平衡回路方块图,图中: $F(S)$ 为前置放大校正环节的传递函数; K_u 为角度传感器系数, $K_u = 172 \text{ V/rad}$; K_M 为力矩器系数, $K_M = 0.034 \text{ N} \cdot \text{m/V}$; H^* 为陀螺仪包括转子和支承的综合角动量。

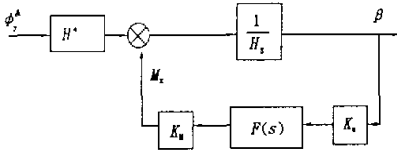


图 3 解耦后的一条等效力矩再平衡回路方块图

根据捷联惯导系统对陀螺仪的要求及系统的具体情况, $F(s)$ 依据下列原则设计:

- (1) 系统应为二型系统。当输入常值角速度或位置角时,陀螺仪的稳态角误差为零;
- (2) 陀螺仪的最大动态角误差必须小于 $\pm 0.5^\circ$, 以保证转子不碰撞仪表壳体上设置的限动器。这一点主要体现了对系统超调量等动态性能指标的要求, 依据分析, 校正环节中应有串联超前校正环节, 并在不同的频率工作范围内设置足够的阻尼环节, 使系统的截止频率和相角裕度满足性能指标要求, 从而改善闭环系统的动态性能;
- (3) 在 $60^\circ/\text{s}^2$ 角加速度输入条件下, 陀螺仪的稳态角误差小于 $\pm 2'$, 由此可知, 使力矩再平衡回路成为二型或二型以上系统的要求是合理的, 同时据此, 可以定出二型系统的开环放大倍数;

(4) 力矩再平衡回路闭环系统的通频带 $\geq 50 \text{ Hz}$ 。在捷联惯导系统中, 通常通过在 IMU 中增加减振胶垫的办法, 来提高系统抗冲击能力及通频带, 从而可降低对惯性元件的通频带要求;

(5) 由于在陀螺仪工作过程中, 存在章动及二次谐波力矩的影响, 因此需在放大校正环节中采取滤波措施。

根据上述要求, 以带宽参数为线索, 通过计算机数字仿真优化, 对放大校正环节进行了综合设计, 其主校正环节的传递函数为:

$$F(S) = \frac{3(0.25S + 1)(0.045S + 1)}{(0.1S + 1)(0.002S + 1)}$$

由图 3 可知, 反馈力矩 M_r 是通过力矩器产生的, 用来平衡由于输入角速度 $\dot{\varphi}_y^g$ 所产生的惯性力矩, 因此闭环传递函数 $\Phi(S)$ 为反馈力矩 M_r 与惯性力矩的比值, 即:

$$\Phi(S) = \frac{M_r}{H^* \dot{\varphi}_y^g} = \frac{\frac{1}{JS^2} \cdot K_u \cdot F(S) \cdot K_M}{1 + \frac{1}{JS^2} \cdot K_u \cdot F(S) \cdot K_M}$$

由此可得出解耦后的等效力矩再平衡回路的闭环幅频特性曲线, 如图 4 所示。

由图可以看出, 最高峰值发生在角频率为 200 rad/s , 误差为 1 dB , 频带约为 80 Hz 左右, 表明放大校正环节的综合设计基本满足要求, 闭环测量精度经过校正环节后是相当高的。

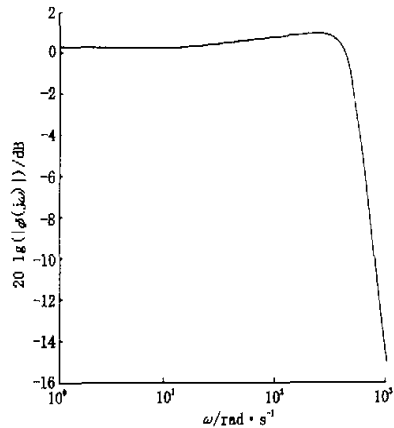


图 4 解耦后的等效力矩再平衡回路的闭环幅频特性曲线

4 系统仿真

为了验证利用传统解耦控制方法对现有单力矩器合成施矩力矩再平衡回路的解耦效果, 利用图 2 及原系统原理方块图分别对原系统及解耦后的大角速率调陀螺仪力矩再平衡回路进行了对比仿真研究。

对于一般的地空导弹、空空导弹而言, 其沿纵轴的最大角加速度为 $50 \sim 60 (^{\circ})/\text{s}^2$ 。图 5、图 6 示出沿陀螺

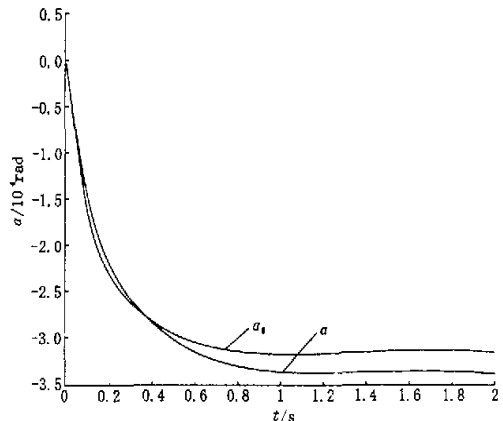


图 5 α 随时间的变化曲线

X 仪轴输入常值角加速度为 $60(^{\circ})/s^2$ 时, 转于相对壳体的倾角 α, β 随时间变化的曲线。 α, β 为解耦后的壳体倾角; α_0, β_0 为原系统的壳体倾角。

由图可以看出, 在加速度输入条件下, 陀螺转子最大稳态倾角 α 约为 0.34×10^{-3} rad, β 约为 2×10^{-8} rad, 达到设计要求。与原有系统曲线相比, 交叉耦合效应减小近 2 个数量级, 解耦效果较好。

假设陀螺转子存在启动偏角为 $3.5'$ (约为 1×10^{-3} rad) 的阶跃干扰输入角。这个角相当于陀螺壳体角位置产生的阶跃变化值。图 7、图 8 示出阶跃角输入条件下, 陀螺转子相对惯性空间的过渡过程曲线。 θ_y 为解耦后转子绕惯性坐标系 Y 轴的转角; θ_{y_0} 为原系统转子绕惯性坐标系 Y 轴的转角。

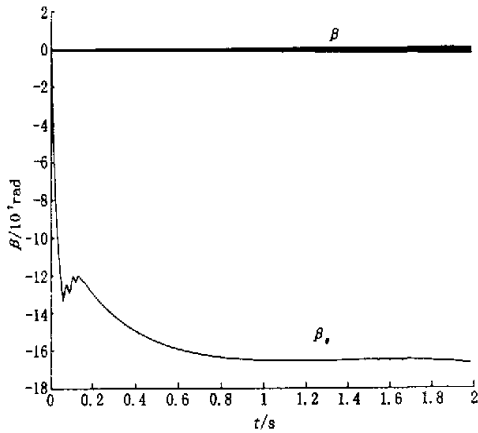


图 6 β 随时间的变化曲线

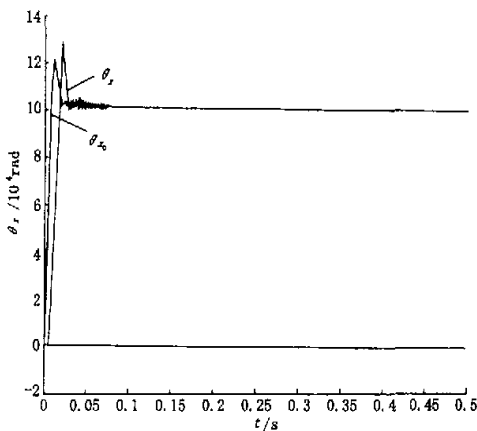


图 7 阶跃输入角作用下 θ_y 的过渡过程曲线

由图可知, 解耦后转子绕 X 轴的转角与原系统基本重合, 峰值偏角的超调量为 20%, 调节时间为 10 ms 左右。解耦效果明显。

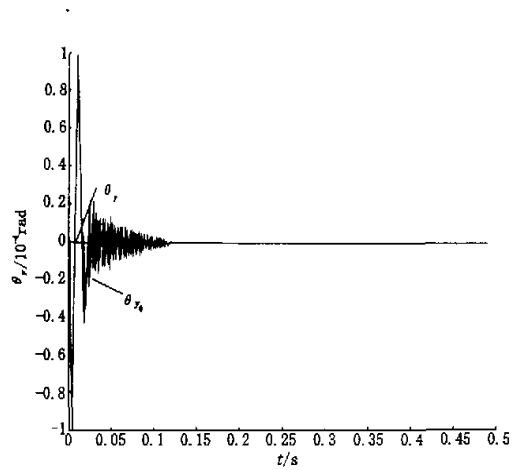


图 8 阶跃输入角作用下 θ_x 的过渡过程曲线

5 结束语

从系统的角度对单力矩器大角速率动调陀螺仪的力矩再平衡回路的解耦控制进行了分析、综合及仿真。通过分析, 可以认为:

- (1) 力矩再平衡回路的解耦控制环节及放大校正环节的设计是比较合理的, 从而使整个系统的各项指标均可满足捷联系统的要求;
- (2) 由于力矩合成而产生的二倍频分量对系统基本没有影响;
- (3) 由于在设计过程中采取解耦措施^[6], 使转子的相对偏角减小, 增加了回路的频带宽度, 对提高仪表的性能有一定的帮助。

参 考 文 献

[1] 戴世荣, 曾荆书, 屈孝池. 2010 年惯性技术发展的思考[A]. 惯性技术发展动态发展方向研讨会文集[C]. 北京: 中国惯性技术学会军工组, 2000.

[2] 李立新. 2010 年战术导弹惯性技术发展探讨[A]. 惯性技术发展动态发展方向研讨会文集[C]. 北京: 中国惯性技术学会军工组, 2000.

[3] 郭秀中. 惯导系统陀螺仪理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.

[4] 任建新, 张鹏, 高维彦, 等. 适用于大角速率动力高谐振陀螺仪的力矩器对比研究[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(3): 53~57.

[5] 林士涛. 动力调谐陀螺仪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[6] 张树侠, 董斌. 动力调谐式双轴速率陀螺仪再平衡回路的分析与设计[J]. 中国惯性技术学报, 1993, 1(4): 16~19.

作者: [任建新](#), [陈明](#), [任卫东](#)
作者单位: [任建新, 陈明 \(西北工业大学, 西安市, 710072\)](#), [任卫东 \(西安市东风机电有限公司, 西安市, 710075\)](#)
刊名: [仪表技术与传感器](#) 
英文刊名: [INSTRUMENT TECHNIQUE AND SENSOR](#)
年, 卷(期): 2001, (10)
被引用次数: 2次

参考文献(6条)

1. [载世荣, 曾荆书, 屈孝池](#) [2010年惯性技术发展的思考](#) 2000
2. [李立新](#) [2010年战术导弹惯性技术发展探讨](#) 2000
3. [郭秀中](#) [惯导系统陀螺仪理论](#) 1996
4. [任建新, 张鹏, 高维彦](#) [适用于大角速率动力高谐陀螺仪的力矩器对比研究](#)[期刊论文]-[中国惯性技术学报](#) 2000(03)
5. [林士谔](#) [动力调谐陀螺仪](#) 1993
6. [张树侠, 董斌](#) [动力调谐式双轴速率陀螺仪再平衡回路的分析与设计](#) 1993(04)

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [任建新, 张鹏, 高维彦, 任思聪](#) [单力矩器大角速率动调陀螺仪力矩再平衡回路的分析与综合](#) -[中国惯性技术学报](#)2001, 9(3)

针对仅有一个力矩器的大角速率动调陀螺仪, 力矩器线圈必须通以与陀螺仪自转角速率同频率变化的交变电流的特点, 分析了采用合成施矩方式的力矩再平衡回路的工作原理. 根据系统要求, 对放大校正环节进行了设计. 通过系统仿真及实测, 验证了仿真模型的可信性及设计的合理性.

引证文献(2条)

1. [张连超, 范大鹏, 范世珣](#) [动力调谐陀螺再平衡回路技术的发展与研究现状](#)[期刊论文]-[导弹与航天运载技术](#) 2008(1)
2. [张春艳](#) [捷联系统中动力调谐陀螺仪脉冲再平衡回路的设计](#)[学位论文]硕士 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ybjsycgq200110014.aspx

授权使用: 上海交通大学(shjtdxip), 授权号: e1899719-e080-4053-ac49-9e9700cc853e

下载时间: 2011年2月27日