

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.004

某武器随动系统双电机消隙设计

杨艳辉, 陈松波

(零八一电子集团有限公司, 成都 611700)

摘要: 为提高随动系统控制性能, 提出一种电机驱动器工作在速度环模式下的双电机消隙算法。以某型微波武器随动系统作为研究对象, 分析齿隙非线性和双电机消隙原理, 建立双电机驱动数学模型, 基于 Matlab 对该消隙算法的控制效果进行对比仿真, 并在实际产品上进行验证。结果表明: 该消隙算法具备可行性和有效性。

关键字: 速度环; 随动系统; 双电机消隙; 偏置力矩

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Design of Dual-motor Anti-backlash in Certain Type Weapon Servo System

Yang Yanhui, Chen Songbo

(No. 081 Electronics Group Co., Ltd., Chengdu 611700, China)

Abstract: In order to improve performance of the servo system, a dual-motor anti-backlash algorithm for motor driver working in velocity loop mode is proposed. The certain type microwave weapon servo system is taken as the research object, and the backlash nonlinearity and the principle of dual-motor anti-backlash are analyzed, the mathematical model of dual-motor drive is established, and the control effect of anti-backlash algorithm is simulated and compared based on MATLAB, and the effectiveness of the backlash elimination algorithm is verified on the actual products. The results show that the anti-backlash algorithm is feasible and effective.

Keywords: velocity loop; servo system; dual-motor anti-backlash; bias torque

0 引言

近年来由于无人机的袭扰, 传统防空体系面临严峻挑战, 高功率微波武器具有区域快速拦截、持续作战时间长、附带损伤小以及使用成本低等特点, 对反无人机(集群)作战具有独特优势。随动系统是高功率微波武器系统的重要组成部分, 其精度指标将直接影响武器的打击精度。实际系统中齿隙、死区、弹性形变等非线性因素对随动系统精度指标产生较大影响。其中齿隙易导致系统振荡, 带来的误差最大^[1], 因此研究消隙问题对提高随动性能指标具有重要意义。

针对随动系统传动链中的齿隙, 众多学者对其进行研究, 并提出了各种方法。张赟等^[2]提出了基于偏置电流的双电机电流环补偿消隙算法; 张珍珍等^[3]提出了基于转速差调节和模型预测控制的消隙方法; 赵国峰等^[4]采取基于状态空间反馈来消除齿隙; 卢金铎等^[5]提出了一种基于双电机传动机械的同步控制方法。上述方法有效减小了齿隙对控制系统的影响, 但这些消隙算法均直接在电流环进行控制, 而在实际工程中, 通用伺服驱动器均采用 Canopen 通讯, 最大通讯延迟可达 4 ms, 这将限制

电流环响应带宽, 严重影响系统控制效果。上述方法基于通用伺服驱动器实现时将导致控制系统动态性能变差, 不能满足随动系统性能要求。

笔者以某型微波武器随动系统作为研究对象, 提出了基于速度环的双电机消隙算法。通过消隙理论分析和消隙算法研究, 建立了双电机传动数学模型, 基于 Matlab 进行仿真论证, 并在实际产品上验证了该消隙算法的有效性。仿真结果和产品应用结果表明: 在速度环工作模式下采取偏置力矩的消隙方法能大大减小齿隙非线性环节的影响, 提高系统的稳定性和跟踪精度。本算法双电机工作在速度环模式, 控制器仅根据系统实际工作情况合理分配双电机差力矩, 通讯时间滞后对系统动态响应性能影响小; 与上述消隙方法相比, 本方法基于通用驱动器实现, 在满足系统控制性能的条件下降低了系统的成本, 因此经济性更好。

1 齿轮间隙模型及双电机消隙原理

理想的齿轮传动模型中, 输入角度和输出角度存在线性关系, 传动比为固定值: $m=\theta/\theta_m$, 式中 θ_m 、 θ 分别为主从传动轴转角。实际上, 由于齿轮加工

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-06-02

作者简介: 杨艳辉(1981—), 男, 山东人, 博士, 工程师, 从事无线电通信、电视、应用电子技术、智慧教育等研究。

E-mail: 13708181901@163.com。

存在公差、装配过程中也会带来额外误差，在相互啮合的齿轮副之间总存在一定的间隙。齿隙的存在对于往返工作中传动装置就造成了空程误差(回差)。描述齿隙非线性的模型有迟滞模型、“振-冲”模型和死区模型等，齿隙死区模型与实际系统比较吻合且数学模型相对简洁，在齿隙非线性控制策略研究中应用最为广泛，其模型可描述为：

$$M = \begin{cases} k(\Delta\theta - \Delta) + b \cdot \Delta\dot{\theta} & \Delta\theta > \Delta \\ 0 & |\Delta\theta| \leq \Delta \\ k(\Delta\theta + \Delta) + b \cdot \Delta\dot{\theta} & \Delta\theta < -\Delta \end{cases} \quad (1)$$

式中： M 为传动输出力矩； k 为传动刚性系数； b 为粘性阻尼系数； $\Delta\theta$ 为主从齿轮的转角差； Δ 为单边齿隙。

如图 1 所示，用 2 台完全相同的电机分别带动相同的行星减速机，再由 2 个减速机输出齿轮带动负载主轴大齿轮；控制器通过 CAN 总线输出补偿力矩，使主轴大齿轮在起动或换向过程中一直受到偏置力矩的作用，2 个减速机输出齿轮分别贴在主轴大齿轮相反的啮合面，使负载不能在齿轮间隙中摆动，从而实现消除间隙，提高系统稳定性和跟踪精度的目的。

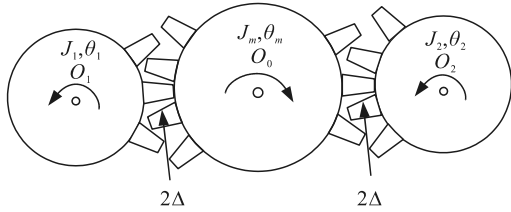


图 1 双电机消隙原理

2 双电机动力学模型

在双电机传动模型基础上，考虑传动齿隙对系统的影响，用 $\phi()$ 表示齿隙的非线性函数， $\theta(t)$ 表示 2 个物体的角度差，利用死区模型

$$\phi(\theta(t)) = \begin{cases} \theta(t) - \Delta & \theta(t) \geq \Delta \\ 0 & |\theta(t)| < \Delta \\ \theta(t) + \Delta & \theta(t) \leq -\Delta \end{cases} \quad (2)$$

由上式可以得到小齿轮和主轴大齿轮间间隙的非线性函数表达式

$$\phi(\theta_{c1} - \theta_m) = \begin{cases} \theta_{c1} - \theta_m - \Delta & \theta_{c1} - \theta_m \geq \Delta \\ 0 & |\theta_{c1} - \theta_m| < \Delta \\ \theta_{c1} - \theta_m + \Delta & \theta_{c1} - \theta_m \leq -\Delta \end{cases} \quad (3)$$

由双电机传动系统的动力学模型，考虑齿隙后可表示为

$$\left. \begin{aligned} K_{e1} \dot{\theta}_{c1} + i_1 R_1 + L_1 (di_1/dt) &= U_1 \\ K_{e2} \dot{\theta}_{c2} + i_2 R_2 + L_2 (di_2/dt) &= U_2 \\ J_1 \ddot{\theta}_{c1} + b_{n1} \dot{\theta}_{c1} + K_{t1} \phi_1(\theta_{c1} - \theta_m) &= K_{m1} i_1 \\ J_2 \ddot{\theta}_{c2} + b_{n2} \dot{\theta}_{c2} + K_{t2} \phi_2(\theta_{c2} - \theta_m) &= K_{m2} i_2 \\ J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m &= K_{t1} \phi_1(\theta_{c1} - \theta_m) + K_{t2} \phi_2(\theta_{c2} - \theta_m) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

令

$$\phi_1(\theta_{c1} - \theta_m) = \varphi_1(\theta_{c1} - \theta_m - \beta_1) \quad (5)$$

其中参数 φ_1 ， β_1 可以表示如下

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1 & |\theta_{c1} - \theta_m| \geq \Delta \\ 0 & |\theta_{c1} - \theta_m| < \Delta \end{cases}$$

$$\beta_1 = f(\theta_{c1} - \theta_m) = \begin{cases} \Delta & \theta_{c1} - \theta_m > \Delta \\ 0 & |\theta_{c1} - \theta_m| \leq \Delta \\ -\Delta & \theta_{c1} - \theta_m < -\Delta \end{cases}$$

同理，令

$$\phi_2(\theta_{c2} - \theta_m) = \varphi_2(\theta_{c2} - \theta_m - \beta_2) \quad (6)$$

则

$$\varphi_2 = \begin{cases} 1 & |\theta_{c2} - \theta_m| \geq \Delta \\ 0 & |\theta_{c2} - \theta_m| < \Delta \end{cases}$$

$$\beta_2 = f(\theta_{c2} - \theta_m) = \begin{cases} \Delta & \theta_{c2} - \theta_m > \Delta \\ 0 & |\theta_{c2} - \theta_m| \leq \Delta \\ -\Delta & \theta_{c2} - \theta_m < -\Delta \end{cases}$$

将方程式(5)和(6)代入式(4)得

$$\left. \begin{aligned} K_{e1} \dot{\theta}_{c1} + i_1 R_1 + L_1 (di_1/dt) &= U_1 \\ K_{e2} \dot{\theta}_{c2} + i_2 R_2 + L_2 (di_2/dt) &= U_2 \\ J_1 \ddot{\theta}_{c1} + b_{n1} \dot{\theta}_{c1} + K_{t1} \varphi_1(\theta_{c1} - \theta_m + \beta_1) &= K_{m1} i_1 \\ J_2 \ddot{\theta}_{c2} + b_{n2} \dot{\theta}_{c2} + K_{t2} \varphi_2(\theta_{c2} - \theta_m + \beta_2) &= K_{m2} i_2 \\ J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m &= K_{t1} \varphi_1(\theta_{c1} - \theta_m + \beta_1) + K_{t2} \varphi_2(\theta_{c2} - \theta_m + \beta_2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

令 $\delta_{c1} = \theta_{c1} - \theta_m$ ， $\delta_{c2} = \theta_{c2} - \theta_m$ 。

根据式(7)可得到双电机联动系统的动力学模型如图 2 所示。

3 动态偏置力矩消隙原理及算法

如图 3 所示，负载在起动过程中，当负载主轴输出力矩为 0 时，通过控制器设置驱动器补偿力矩使 2 个电机减速机输出差力矩 $\pm M_0$ 来产生预紧力，2 个电机通过减速机输出齿轮与主轴大齿轮紧密贴

合来抵消间隙^[6]；当负载主轴出力矩增加时，2 个电机减速机输出齿轮的力矩变化曲线如图 3 中 OA 段所示，电机 1 减速机的输出力矩逐步增大，电机 2 减速机的输出力矩逐步减小，负载主轴合力矩增大；当主轴输出力矩增大至 $2M_0$ 时，电机 1 减速机输出力矩增大至 $2M_0$ ，而电机 2 减速机输出力矩减小至 0，此时电机 2 减速机输出齿轮与主轴大齿轮

脱离接触；当主轴出力矩继续增大时，电机 1 减速机输出力矩继续增大，电机 2 减速机输出齿轮贴向负载主轴大齿轮的另一贴合面，此时主轴大齿轮在 2 个减速机输出齿轮的共同驱动下运动；按照消除算法中偏置力矩所设计的控制规则，在 B 点时 2 个电机偏置力矩开始变小，到 C 点时变为 0，2 个电机减速机共同驱动负载转动。

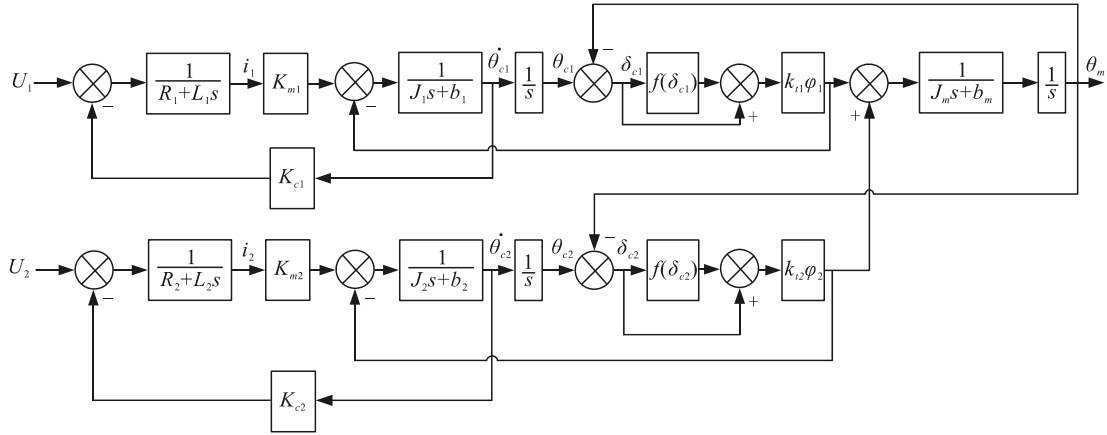


图 2 含齿隙的双电机动力学模型

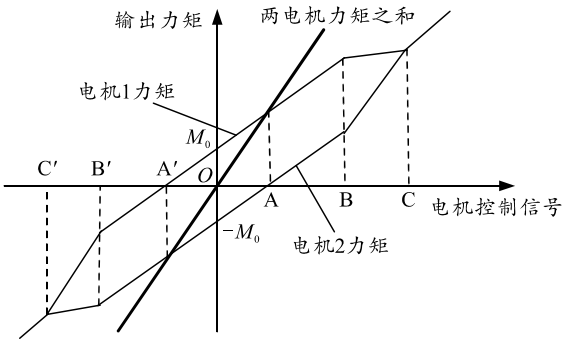


图 3 动态偏置力矩控制曲线

针对上述消除控制原理，笔者提出一种基于速度环的双电机消除算法。该算法根据 2 个电机给定的负载力矩大小，采取分区线性分配偏置力矩实现系统平稳消除。设控制器通过 CAN 通讯读取 2 个电机电流给定值分别为 I_1 和 I_2 ，力矩常数为 KI ，则两电机力矩之和为

$$T=KI \times (I_1 + I_2) \tag{8}$$

取 M_0 为负载静摩擦力矩，则电机 1 输出力矩 T_1 和电机 2 输出力矩 T_2 如下：

$$\left. \begin{aligned} T_1 = M_0, T_2 = -M_0 & \quad T = 0 \\ T_1 = \frac{T}{2} + M_0, T_2 = \frac{T}{2} - M_0 & \quad |T| < 4M_0 \\ T_1 = \frac{T - 4M_0}{4} + 3M_0, T_2 = 3\frac{T - 4M_0}{4} + M_0 & \quad 4M_0 \leq |T| < 8M_0 \\ T_1 = \frac{T}{2}, T_2 = \frac{T}{2} & \quad |T| > 8M_0 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

由于电机 1 和电机 2 速度环校正输出电流分别为 I_1 和 I_2 ，对应力矩分别记为 T_{v1} 和 T_{v2} ；电机 1 和电机 2 偏置力矩分别记为 $T_{偏1}$ 和 $T_{偏2}$ ，则

$$\left. \begin{aligned} T_{偏1} = T_1 - KI \times I_1 \\ T_{偏2} = T_2 - KI \times I_2 \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

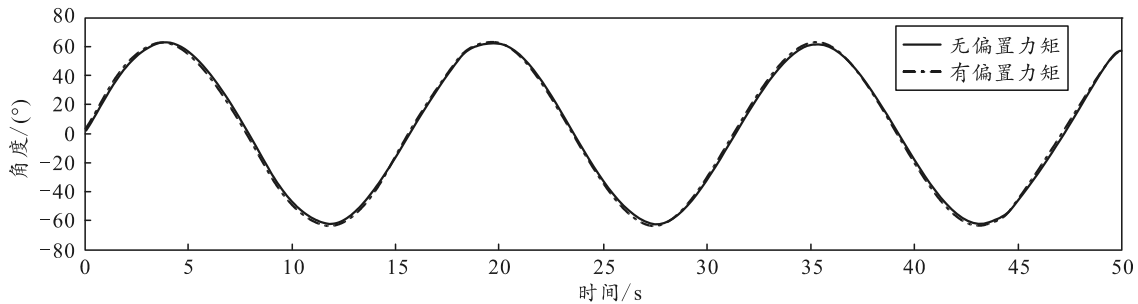
4 双电机消除建模仿真及工程验证

根据双电机动力学模型和动态偏置力矩补偿原理，采取对主从电机施加偏置力矩的方案实现消除。

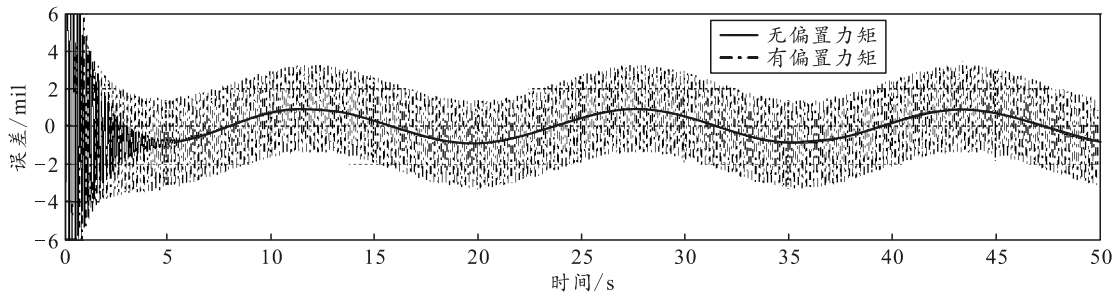
基于 Matlab 对系统消除前和消除后的位置响应情况进行仿真对比，仿真结果如图 4 所示。

根据仿真结果对比，无偏置力矩时最大跟踪误差为 3 mil，有偏置力矩时最大跟踪误差为 1 mil，验证了该消除算法的可行性。

基于双电机消除算法，在某微波武器随动平台方位轴进行工程验证；实际测试正弦跟踪角度及误差曲线如图 5 所示，可知消除实际效果与仿真结果相吻合。



(a) 实际角度曲线对比



(b) 误差曲线对比

图 4 有无偏置力矩正弦跟踪效果仿真角度曲线及误差曲线对比

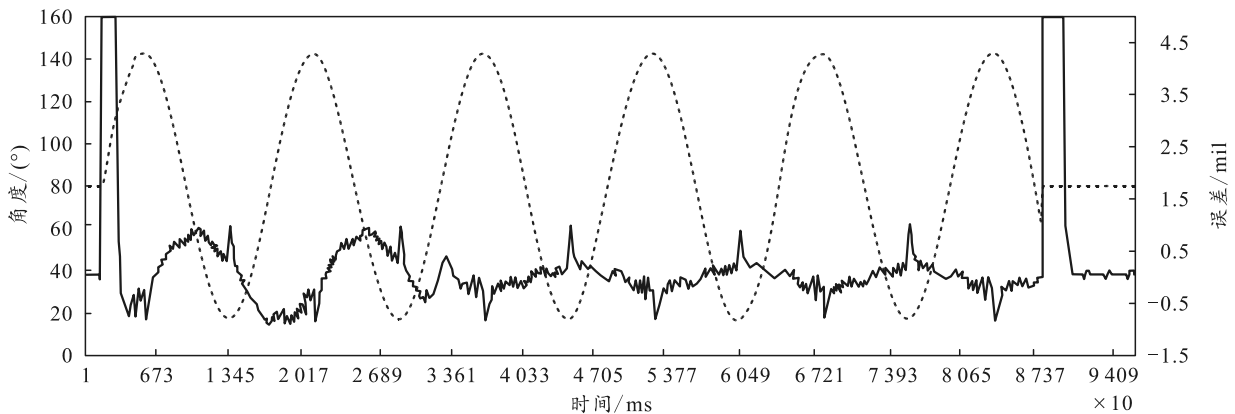


图 5 产品实测正弦跟踪角度及误差曲线

5 结束语

笔者分析了齿隙非线性和双电机消隙原理，建立了双电机驱动数学模型，设计了一种速度环工作模式下调整偏置力矩的消隙系统，并在 MATLAB 平台对消隙算法进行了建模仿真，论证了消隙算法可行性。由上述分析、仿真及工程验证可知：该双电机消隙系统能消除齿隙对控制系统的影响，提升了系统的控制性能。

参考文献：

[1] 袁新星. 多电机同步联动消隙伺服系统动力学建模与控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

[2] 陈赞, 张祥. 基于偏置电流的双电机伺服系统消隙[J]. 电子设计工程, 2012, 20(14): 41-43, 47.

[3] 张珍珍, 彭超, 邵仕泉. 基于转速差调节和模型预测控制的双电机伺服系统消隙控制[J]. 微电机, 2017, 50(1): 54-58.

[4] 赵国峰, 陈庆伟, 胡维礼. 双电机驱动伺服系统齿隙非线性自适应控制[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(2): 187-192.

[5] 卢金铎, 刘锦波. 双电机传动机械系统的同步控制[J]. 控制工程, 2005, 12(4): 398-400.

[6] JOHANNES S. Dual Motor Control for Backlash Reduction. Master's thesis, Dept. of Automatic Control[D]. Sweden: Lund University(LTH), 2009. ISRN LUTFD2/TFRT-5841-SE.