

文章编号:1009-3087(2001)05-0039-04

基于矢量键图法建模对雷达天线伺服传动系统的研究

黄大贵,武好明,姚振辉

(电子科技大学 电子机械系,四川 成都 610054)

摘要 基于矢量键图法对天线伺服传动系统进行动力学建模,重点对刚体空间运动的键图表示及系统状态方程的推导。此方法简洁、直观、图形化,对复杂机电系统建模具有优越性。

关键词 矢量,键图,天线系统

中图分类号:TP36;TG659

文献标识码:A

Vector Bond Graph Dynamics Modeling of Radar Antenna Servomechanism System

HUANG Da-gui, WU Hao-ming, YAO Zhen-hui

(Dept. of Electronic Mechanics, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract In this paper, the dynamic model of the servo transmission system was developed with the tool of vector bond graph. The key points are the bond graph expression of spatial movement of rigid body and deduction of the system state equations. The method of vector bond graph is simple, visual and graphic, it is useful in modeling of complicated electromechanical system.

Key words vector; vector bond graph; radar antenna system

天线伺服传动系统的作用是使天线能够按照预定的规律或者跟随目标运动,准确指向目标。随着天线性能指标提高,对于天线伺服系统的机械设计、控制系统设计等都提出了越来越高的要求。天线伺服系统的动态分析具有十分重要的现实意义。建立符合要求的系统数学模型,是对动态系统进行分析、识别与综合的前提。实际工程系统复杂多样,往往是多种能量范畴的耦合,如机械、电磁、液压、热力系统等。键图是一种统一处理多种能量范畴工程系统的图形化建模工具,与能量法、网络法等相比较,简洁、直观、通用性好,在系统动力学及控制领域有着很好的应用前景。传统的键图法是基于一维即标

量)能量口变量的一种建模方法,不适于解决三维运动问题。Fahrenhold 和 Wargo 提出了基于二阶张量能量口的矢量键图法,较好地克服了传统键图法的缺陷,而将此方法应用于多能量耦合复杂运动系统建模的研究目前在国内、外还较少见。本文即以方位-俯仰型天线伺服传动系统为例,探讨了矢量键图法在多能量耦合情况下的实际应用。

1 系统物理模型

方位-俯仰型天线的运动为天线座转盘水平方位转动和天线俯仰运动的合成。本文采用集中元件模型以简化分析过程,并且对系统进行线性化,忽略死区、非线性摩擦、齿轮回差等非线性因素。系统物理模型见图1。图1中1为直流电机,质量为 M_{M1} ,转动惯量为 J_{M1} ;2为电机1输出轴处的旋转阻尼 B_{M1} ;3为行星齿轮,质量为 M_2 ,绕质心C的转动惯

收稿日期 2001-05-21

作者简介 黄大贵(1952-),男,博导,研究方向:智能制造系统,

电子精密机械及信息处理。

万方数据

矢量键图应首先分解为标量键图,从而分配因果关系,推导状态方程。

图5中的矢量键图分解为复合键图,见图6。

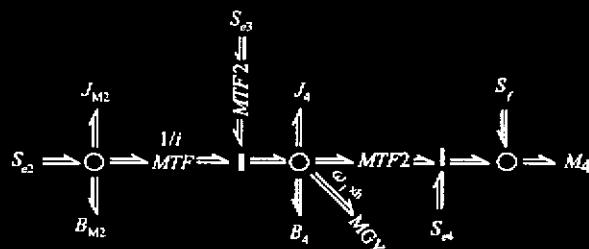


Fig.6 Compound bond graph of antenna

由于选用了特定的坐标系进行分解,复合键图和矢量键图相比,增加了两个二阶调制能量口,即变换器 $MTF2$ 和旋转子 MCY 。

设刚体坐标系的初始方位同绝对坐标系重合,然后,刚体坐标系统自己 Y 轴旋转 θ 角,即水平方位转动 θ 角;再绕当前坐标系的 Z 轴旋转 φ 角,即天线俯仰转动 φ 角,即到达当前刚体坐标系的方位。旋转变换的变换矩阵

$$T_1 = T_y T_z T_x = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ -\sin \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \end{bmatrix}, T_x, T_y, T_z$$

分别为绕坐标轴 x, y, z 的旋转变换矩阵。本例中 $\varphi = 0, T_x = E$

总的变换矩阵

$$MTF_1 = T_1 \cdot T_2 = \rho \begin{bmatrix} 0 & -\sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi \\ 0 & 0 & \cos \varphi \\ 0 & -\cos \theta & \sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix};$$

相对速度 $V_{CB} = MTF_1 \cdot \omega =$

$$\rho \begin{bmatrix} 0 & -\sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi \\ 0 & 0 & \cos \varphi \\ 0 & -\cos \theta & \sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi \\ 0 & \cos \varphi \\ -\cos \theta & \sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = MTF_1 [\omega_x, \omega_y]^T;$$

根据上节确定的变换器和旋转子,图6复合键图分解为图7中标量键图。

2.3 伺服电源及电机系统键图

系统采用直流电机驱动,可控硅整流装置。

电机子系统同机械部分的耦合关系为:

$$\begin{cases} E = k\omega \\ I_d = \frac{1}{k}\tau_\omega; \end{cases}$$

其中, k 为电机常数; ω 为电机转速; τ_ω 为电机转矩。

作出伺服电源及电机子系统的键图,见图8。

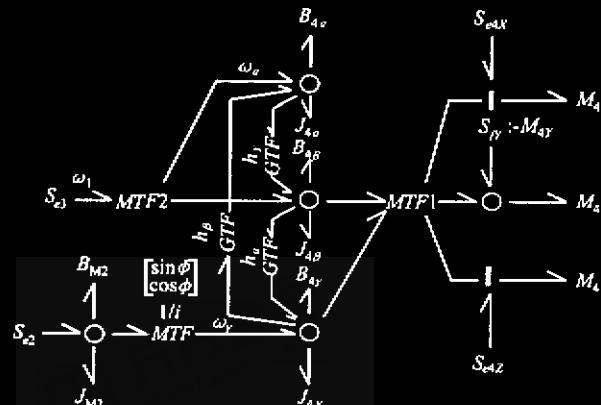


Fig.7 Scalar bond graph of antenna

Fig.8 Bond graph of servo power source and motor subsystem

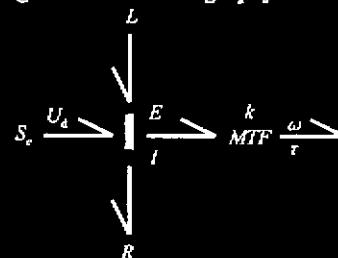


Fig.8 Bond graph of servo power source and motor subsystem

2.4 系统标量键图

将各子系统标量键图组合起来,得到整个系统的标量键图,如图9所示。

3 系统状态方程推导

选择具有积分因果关系的储能元件的能量变量为状态变量,共有 $p_2, q_7, p_9, p_{25}, q_{11}$ 和 q_{29} 六个状态变量,在加上水平转角 θ 和俯仰角 φ ,一共是 8 个状态变量。图9中,并不是所有的储能元件都满足积分因果关系,如: M_2, J_1, M_4 等,都是满足微分因果关系。如果一个储能元件具有强加给它的微分因果关系,就意味着它不是一个独立状态变量。

根据文献[2]中介绍的方法,可以由系统键图得出三类方程,即元件方程、串并联节点处能量平衡方程及串/并联处流/势相等方程。三类方程组联立,消去中间变量及冗余的状态变量,得到下列状态方程组。

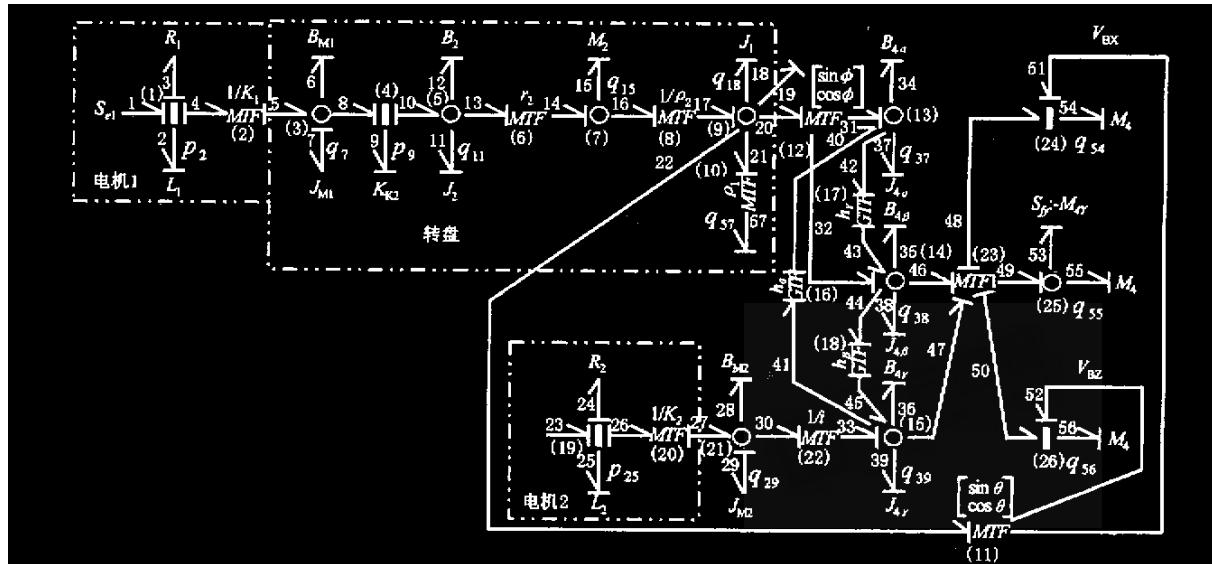


图9 系统标量键图
Fig.9 System scalar bond graph

$$\dot{p}_2 = u_1 - \frac{k_1}{J_{M1}} q_7 - \frac{R_1}{L_1} p_2;$$

$$\dot{q}_7 = \frac{k_1}{L_1} p_2 - \frac{B_{M1}}{J_{M1}} q_7 - K_{K2} p_9;$$

$$\dot{p}_9 = \frac{1}{J_{M1}} q_7 - \frac{1}{J_2} q_{11};$$

$$\dot{p}_{25} = u_2 - \frac{k_2}{J_{M2}} q_{29} - \frac{R_2}{L_2} p_{25};$$

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_{11} \\ \dot{q}_{29} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_2 i}{L_2} p_{25} + B_{11} q_{11}^2 + B_{12} q_{29} \\ K_{K2} p_9 + B_{21} q_{11} + B_{22} q_{11} q_{29} \end{bmatrix};$$

$$\dot{\theta} = \frac{r_2}{J_2 \rho_2} q_{11}; \quad \dot{\varphi} = \frac{1}{J_{M2} i} q_{29}$$

其中, u_1, u_2 分别为二个直流电机的输入电压; k_1, k_2 分别为二个直流电机的电机常数。

$$A_{11} = \frac{\rho M_4 r_2}{\rho_2 J_2} (\rho \cos \varphi \sin \theta - d \cos \theta \cos \varphi);$$

$$A_{12} = \frac{\rho^2 M_4}{i J_{M2}} (\cos^2 \theta \sin \varphi \cos \varphi - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) + \frac{\rho^2 M_4}{i J_{M2}} \cos^2 \varphi + i + \frac{J_{4\gamma}}{i J_{M2}};$$

$$A_{21} = 1 + \frac{r_2^2}{\rho_2^2} \left(\frac{J_1}{J_2} + \frac{M_4 d^2}{J_2} + \frac{\rho_1 M_1}{J_2} + \rho^2 M_4 \cos^2 \varphi \right) + \frac{r_2 M_2}{J_2};$$

$$A_{22} = \frac{r_2 \rho^2 M_4}{\rho_2 i J_{M2}} \cos \theta \cos \varphi \sin \theta \sin \varphi -$$

$$\frac{r_2 \rho M_4 d}{\rho_2 i J_{M2}} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sin \varphi;$$

$$B_{11} = \frac{r_2^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\rho_2^2 J_2^2} (J_{4\alpha} - J_{4\beta});$$

万方数据

$$B_{12} = \frac{B_{4\gamma}}{i J_{M2}} - \frac{B_{M2}}{J_{M2}}; B_{21} = -\left(\frac{B_2}{J_2} + \frac{r_2^2}{J_2 \rho_2^2} + \frac{r_2^2 B_{4\alpha}}{J_2 \rho_2^2} \right);$$

$$B_{22} = -\frac{r_2^2}{J_2 \rho_2^2} \sin \varphi \cos \varphi (J_{4\alpha} - J_{4\beta})$$

4 结束语

探讨了键图法在天线伺服传动系统建模领域的应用,要点在于使用矢量键图法描述刚体复杂运动。推导出的状态方程是一个有8个状态变量的具有严重非线性形式的状态方程组,这种非线性主要是由机械系统进行的角运动所具有的几何非线性特点所带来的。矢量键图法,作为一种图形化建模方法,因其自身的特点及优越性,在系统动力学计算机辅助分析领域必将大有用武之地。

参考文献:

- [1]Karnopp D C, Rosenberg R C. 系统动力学—应用键合图方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [2]谢寄石. 机电系统动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [3]王庭树. 机器人运动学及动力学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990.
- [4]党锡淇, 许庆余. 理论力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [5]Fahrenhold E P, Wargo J D. Vector bond graph analysis of mechanical systems [M]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1991, 113: 344~353.
- [6]Casey J, Lam V C. A tensor method for the kinematical analysis of systems of rigid bodies [J]. Mechanism and Machine Theory, 1986, 21(1): 87~97.

(编辑 张凌之)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>