

捷联式导航平台

JIELIANSHI DACHUANGLUO FENGTAI

439146

科学出版社

V24.5/13

439446

捷联式导航平台

J. C. 洪 编

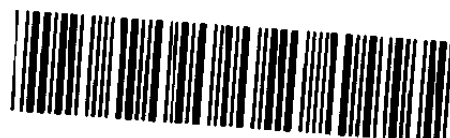
汪开远 译

HK 03/28



科学出版社

1979



C0222368

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了捷联式惯性导航系统坐标变换的算法及实现方法;分析了再平衡回路系统,叙述了其实现方法;提出了用计算机实现“裕度”编排。

本书可供从事陀螺仪及导航系统的工程技术人员参考。

J. C. Hung

A STUDY OF STRAPDOWN PLATFORM TECHNOLOGY

(NASA-CR-123710)

The University of Tennessee, 1972

捷联式导航平台

J. C. 洪 编

汪开远 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1979年8月第一次印刷 印张:5 1/8 插页:1

印数:0001—3,380 字数:114,000

统一书号:13031·1069

本社书号:1500·13—2

定价: 0.82 元

译 者 序

捷联式导航平台是一种新型的导航设备。它与陀螺稳定平台相比有许多突出优点：一、由于去掉了平台的框架系统，故可以消除平台稳定过程中的各种误差；二、因为不存在框架锁定的问题，所以能容许全姿态工作；三、由于不存在机械式平台框架，系统可以做得体积小、重量轻、易于装配和维护；四、捷联式系统容易使敏感元件重复，实现富裕编排，以提高系统的可靠性。

近些年来，随着控制理论、陀螺技术、计算技术和固体集成电路的蓬勃发展，捷联式或者没有框架式的惯性导航系统，在国外若干系统中已实际运用。

本书比较系统地介绍了系统坐标变换的算法及实现方法、分析了再平衡回路系统，叙述了其实现方法；同时还提出用计算机实现“裕度”编排提高系统可靠性问题。在理论分析、方案比较等方面叙述较为全面。本书对工程实现、实验数据叙述得少，这是不足之处。

本书对于从事航空、航海、航天、火箭导弹载体控制系统设计，导航系统设计，陀螺仪设计的工程技术人员，高等院校有关专业师生有一定参考价值。

本书译稿曾经尉立本同志校阅，最后由蔡金涛同志审阅，特此致谢。由于我们水平所限，书中错误和不当之处一定不少，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 引言	1
第二章 再平衡回路分析	7
引言	7
零偏误差的影响	9
波形对敏感元件精度的影响	14
结论	25
第三章 采用重复的二自由度陀螺的捷联式平台	26
引言	26
系统的可靠性	27
最优的系统编排	29
敏感元件性能的管理	35
检测与鉴别	36
数据处理与系统重新编排	38
敏感元件的重新校准	42
附录	43
第四章 用数字微分分析器(DDA)实现姿态计算	55
引言	55
数字微分分析器	56
方向余弦算法	56
欧拉角变换算法	62
欧拉四参量算法	66
四元数算法	71
凯利-克莱恩参量算法	82
矢量表示算法	89

用数字微分分析器来实现姿态算法	93
第五章 再平衡电子设备	114
前言	114
被分析系统的描述	115
系统各部分的分析	120
整个系统的考虑	149
结论与建议	153
第六章 需要进一步研究的问题	157

第一章 引 言

J. C. Hung

这是一篇关于捷联式平台工艺学的报告。这项研究由美国国家航空和宇宙航行局(NASA), G. C. 马歇尔空间飞行中心提出, 由田纳西(TENNESSEE)大学根据 NAS8-2796 合同完成。

捷联式原理

捷联式导航平台是作为一种新一代的导航设备出现的。其基本原理是: 1) 将几个陀螺和加速度表直接安装在载体上; 2) 通过用计算机提供坐标基准起到与稳定平台同等的作用。载体三个轴的角速度可以由一组陀螺仪和(或)加速度表敏感出来。然后将这个信息在短时间内进行积分, 即可得到载体坐标系统内的角增量。如果增量足够小, 而且所用数字计算机的计算速度又足够快的话, 那么, 就可以维持住一个精确的角度基准。

与稳定平台系统相比采用捷联式系统有几个主要的优点。第一, 由于去掉了有框架的平台, 所以, 可以消除平台稳定过程中的各种误差。第二, 因为不存在框架锁定的问题, 所以能够容许全姿态工作。第三, 由于不存在机械式平台框架, 因而系统就可以小而轻、结实并易于维护。最后一个优点, 也许是最重要的一个优点, 就是捷联式系统容易使敏感元件的重复提供重复度, 因而可以提高系统的可靠性。捷联式系统

之所以能取得上述几个优点，是以采用较复杂的电子设备和较严密的计算机为代价的。然而，由于集成电路工艺的发展，使得花这样的代价是值得的。

一般来说，捷联式技术的研究可以分成两个方面。即平台系统方面和敏感元件子系统方面。在平台系统方面，主要是考虑如何运用一组敏感元件，使得部件可靠性最大和信息精度最高。在敏感元件子系统方面，最终的目的就是要得到最精确和最可靠的敏感元件，这取决于敏感元件的工作原理、机械结构以及相应的电子线路。

再平衡迴路

捷联式敏感元件系统的关键就是运用再平衡力矩来连续不断地恢复敏感元件输出轴的位置。再平衡的特点使得计算大大简化、非线性影响减少、框架锁定避免出现。图1是一个陀螺再平衡迴路简图。给载体一个输入速率就会引起绕陀螺输出轴的一个进动。输出轴的运动是由将这一信息送到电子装置的传感器来敏感的。电子装置产生一系列电流脉冲，而这些脉冲的形状取决于输入信号。每个脉冲的符号取决于陀螺输出轴角度的符号。同时每个脉冲的幅度、宽度则精确地保持恒定。因此，每个脉冲就表示一个输出角度的增量变化。这些脉冲用于两个不同而又相关的目的：1)作为陀螺力矩器的输入电流以使输出轴再平衡。2)作为计算机的离散数据输入以保持计算机存储器中的姿态基准。

再平衡迴路设计要符合以下四项主要要求：第一是再平衡迴路的抗干扰性和稳定性，它决定了敏感元件所引进的动态误差。回路必须提供足够大的最大力矩，以便对最大可能维持的角速率和线性加速度输入进行再平衡。因此它需要有一个补偿得非常好的高增益反馈回路。第二，是对所产生的

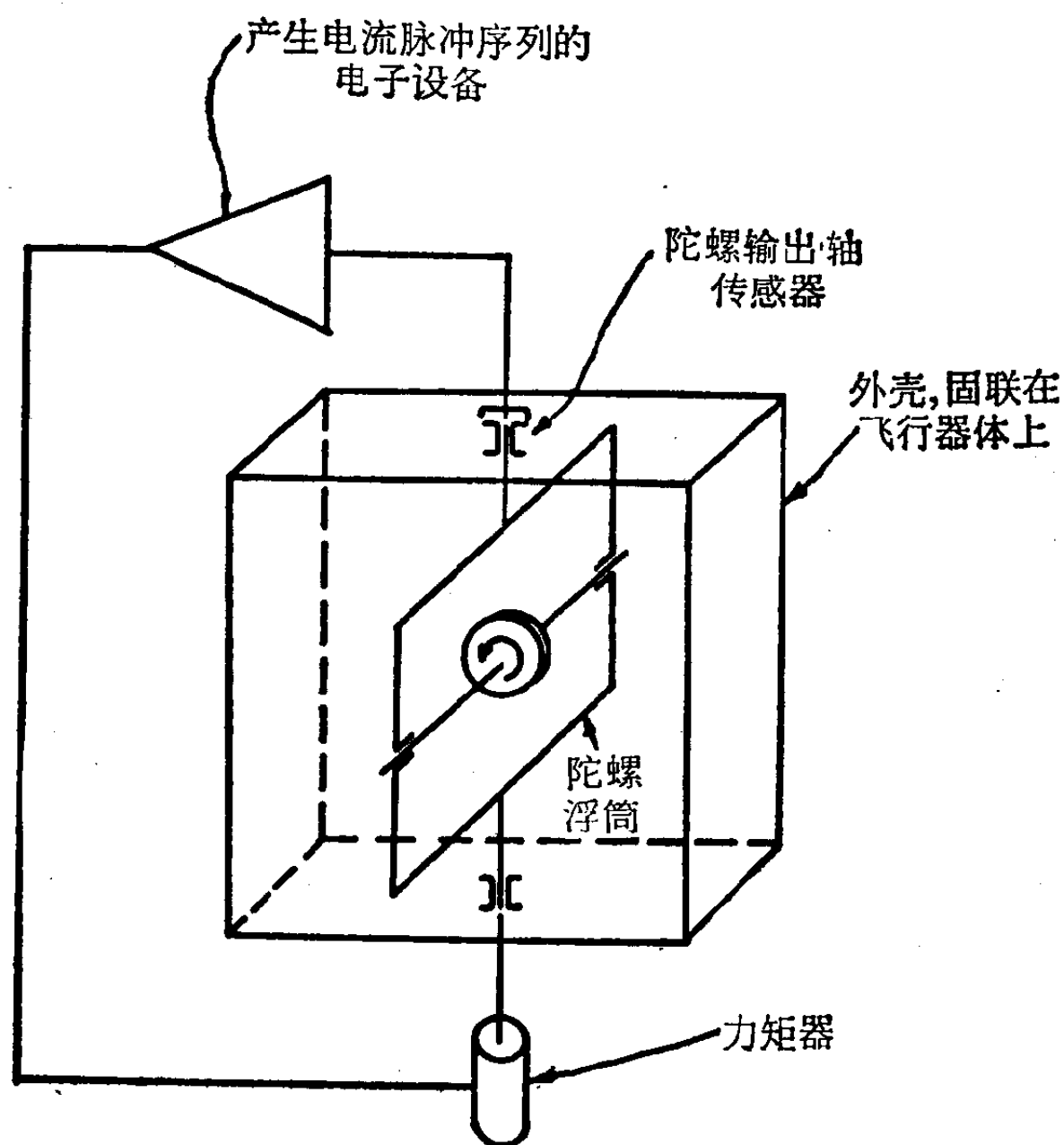


图 1-1 单自由度陀螺再平衡回路

电流脉冲特性的要求。欲得到好的输出分辨率，脉冲宽度必须小。然而，要产生有效的再平衡力矩，每个脉冲的强度又必须足够地大。第三，脉冲频率必须能够同力矩器的频率响应特性曲线相一致，以便在整个动态范围内得到好的线性。第四，要求每个电流脉冲波形对电子组件的不可避免的各种变化很不敏感，以避免产生“刻度因子误差”。这就是假定，计算机从敏感元件接收来的信号是与敏感元件输出轴的再平衡机械角运动相匹配的。通过对再平衡技术方案的精心选择、电

路的精心设计和采用适当补偿的再平衡回路，这一要求是能够达到的。

通过重复来提高可靠性

捷联式系统突出的优点之一就是容易实现敏感元件的重复。此系统必须能够胜任敏感元件性能的管理任务，其中包括故障检测、不合格敏感元件的鉴别、系统的重新配置，还可能包括敏感元件的重新校准等工作。采用单自由度敏感元件目前已经研究出很多种敏感元件的重复编排方法。为了改进系统的可靠性和精度，这方面的研究仍有继续的必要。从原理上讲，二自由度陀螺也可以用在捷联式系统上，其中每个陀螺都能提供沿两个坐标轴的姿态信息。重要的是，要了解如何实现这种类型的捷联式系统，以及它们与其它类型系统在性能、可靠性、复杂程度等方面相比怎样。

姿态算法

捷联式导航系统的两个主要困难就是存在刻度因子误差和坐标转换误差，而这些是稳定式导航系统所没有的。前者已在前一节中提到过。引起坐标转换误差有三个因素：1)计算速度不够高。2)截断误差。3)舍入误差。解决这个问题的途径显然是采用快速大型计算机；然而，这些误差还可以通过采用更为有效的计算方法来减少。我们已经知道了几种变换算法，然而，目前还没有选择最好算法的准则。

再平衡电子设备

为了获得精确而可靠的完整系统，再平衡力矩器必须用间隔、幅度、形状都很好地规定的、非常精确的电流脉冲来驱动。因此，电子脉冲发生器必须在所预期的环境范围内提供这

样的输出信号。由于对电子脉冲发生器有严格的性能要求，因此，就需要精心地设计电子线路，即要采用最好的电子组件和引入新颖的电路概念。

报告的组成

报告的第二章是脉冲再平衡回路的分析。第三章专门研究采用二自由度陀螺敏感姿态的高可靠性捷联系统这一新概念。第四章论述了各种变换算法的基本概念，并提出了用数字微分分析器来实现这些算法的方案。第五章给出了再平衡电子设备的分析结果。第六章，即最后一章，提出了尚待研究解决的一些问题。每一章的末尾附有参考文献。

有关的出版物

按照这个合同还进行了其它一些研究，有关的几篇文章，列表于下：

1. W. L. Rowe, "Analysis of Effects of Electronically Induced Errors in Strapdown Sensor Rebalance Loop", A Master of Science Thesis, The University of Tennessee, December, 1971.
2. W. L. Rowe and J. C. Hung, "Error Analysis for Strapdown Sensor Rebalance Loop", Proceedings of the Fourth Southeastern Symposium on System Theory. University of Kentucky, April 3—4, 1972.
3. Y. Yeh and J. C. Hung, "DDA Realizations of Attitude Algorithms", Proceedings of the Fifth Hawaii International Conference on System Science, University of Hawaii, January 11—13, 1972.
4. Lesi Han, "Redundancy Configurations and Reliability of Strapdown Navigation Platform Using Two-Degree-of-Freedom Gyros", A Master of Science Thesis, The University of Tennessee, March, 1972.

参 考 文 献

- [1] R. M. Bumstead and W. E. Vander Velde, "Navigation and Guidance Systems Employing a Gimballess IMU", *Guidance*

and Control: Vol. II, Edited by Langford and Mundo, Progress in Astronautics and Aeronautics Series, Vol. 13, Academic Press, 1963, pp. 391—419.

- [2] T. F. Wiener, "Theoretical Analysis of Gimballess Reference Equipment Using Delta-Modulated Instrument", A Doctoral Dissertation, MIT, March, 1962.
- [3] U. S. Navy, "Polaris-Fleet Ballistic Missile Weapon System Fact Sheet", January, 1965.
- [4] B. Miller, "SST Avionics to Combine Proven Systems with Growth in Technology", *Aviation Week and Space Technology*, October, 1966.
- [5] A. Grammatikos, "Gimballess Inertial Systems for Space Navigation", A Doctoral Dissertation, University of Pennsylvania, 1965.
- [6] J. P. Gilmore, "A Non-Orthogonal Gyro Configuration", A Master of Science Thesis, MIT, 1967.
- [7] J. E. Bortz, "A New Concept in Strapdown Inertial Navigation", A Doctoral Dissertation, MIT, 1969. (Also NASA TR-R-329).
- [8] United Aircraft Corporation, "A Study of the Critical Computation Problems Associated with Strapdown Inertial Navigation Systems", NASA CR-968 April, 1968.
- [9] J. W. Jordan, "Direction Cosine Computational Error", NASA TR R-304, March, 1969.
- [10] J. W. Jordan, "An Accurate Strapdown Direction Cosine Algorithm", NASA TND-5384, September, 1969.
- [11] R. A. McKern, "A Study of Transformation Algorithm for Use in a Digital Computer", A Master of Science Thesis, MIT, 1968.

第二章 再平衡回路分析

J. C. Hung W. L. Rowe

摘 要

本章分析了幅度为常值这种类型的脉冲再平衡回路。并对这种类型的系统特性进行了讨论。同时也将对由于脉冲形状畸变、直流偏差以及采样处理引起的敏感元件误差进行分析。

引 言

敏感元件再平衡回路的作用就在于能够连续不断地将敏感元件轴从任一变化的位置恢复到它应在的位置上。敏感元件轴位置的这种变化是由于飞行器的姿态状态改变所引起的。正确地测量再平衡信号便可确定飞行器的姿态。

虽然可能采用几种不同类型的信号对敏感元件进行再平衡，而姿态变化所必需的测量精度需要有一个这样一种形式的校准数字信号，即每个脉冲具有与其相应的一定的重量。这样一种再平衡回路如图 2-1 所示。脉冲发生器的用途就在于分析从传感器来的连续信号，并提供一定数目的脉冲来使敏感元件再平衡，同时又为计算机提供高度校准的信息。

依据再平衡脉冲系列的形式，有几种不同的脉冲再平衡技术，如图 2.2 所示。二元技术所用的脉冲是频率和幅度均为

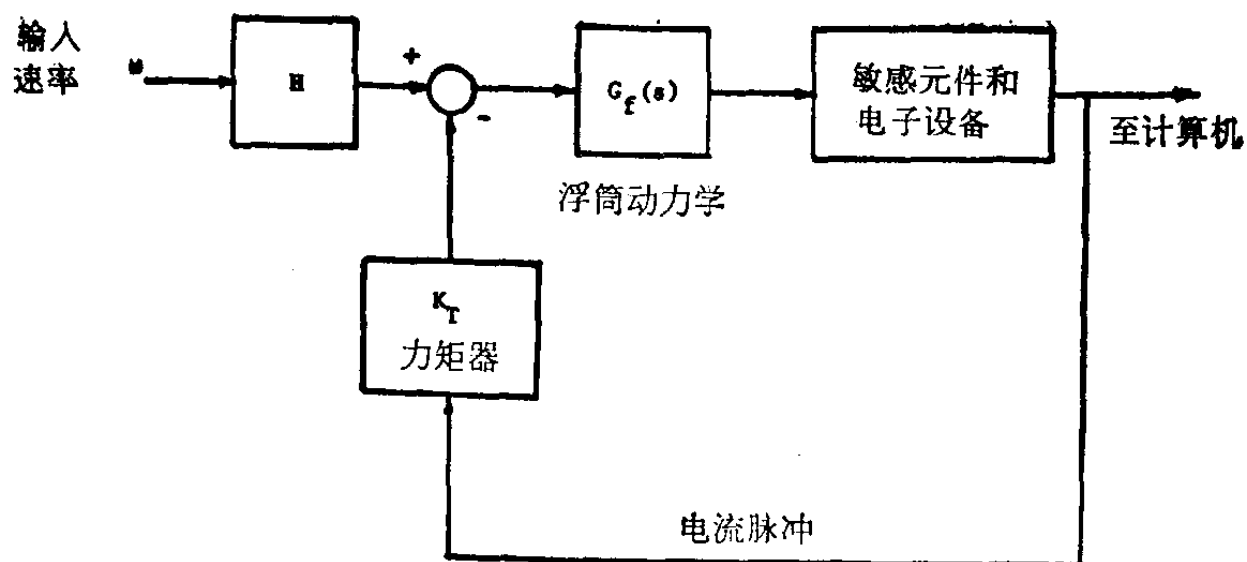


图 2-1 基本的再平衡回路

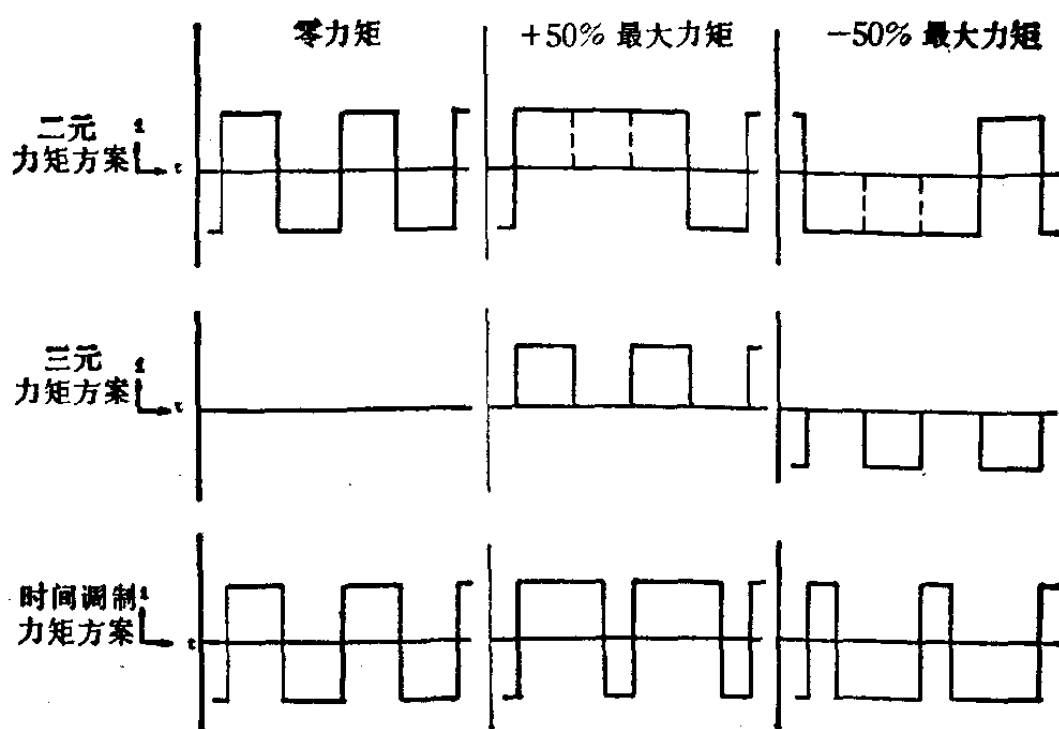


图 2-2 各种加矩方法的力矩脉冲

常值的脉冲。实质上，对脉冲发生器所提出的问题就是正确地选择脉冲的极性。宽度-调制二元技术的概念同上，但对脉冲发生器所提出的问题则增加了一个，那就是将脉冲宽度确定在一定的范围之内。在为计算机提供量化信息时可变的脉冲宽度也会引起问题，因为简单的计数技术是不能区别极性相同而宽度不同的脉冲的。三元技术是随机的，只有在传感

器幅度超过某一数值时才会出现脉冲。宽度为常值和宽度可变的两种脉冲均可用于三元系统上。很显然，当脉冲发生器的作用越来越多时，电路本身亦就日趋庞大而复杂。

本章的目的在于对捷联式敏感元件回路中可能产生的误差进行分析。研究了脉冲发生器所引起的各种误差。因为脉冲发生器不理想，所以必须考虑电子设备所产生的零偏信号这样一些误差，以及力矩脉冲非零上升时间所引起的误差。知道了这些误差及其影响，进一步考虑了可能的改进方案。零偏以及电流脉冲形状的影响将在下面几节分别进行分析。

零偏误差的影响

零偏误差

为了产生再平衡敏感元件所需要的力矩，就要用电子网络产生电流脉冲，以便驱动实际上是一个电磁装置的力矩器。在理想情况下，这种网络应具下列特性：(1) 输入-输出之间的相互关系是线性的；(2) 能精确校准。为了使其具备这些特性，就要求保证电流脉冲的形状不失真，并且当输入为零时净输出电流亦为零。

零偏误差对敏感元件精度的影响

根据对装有一个积分器系统的了解，可明显地看出零偏漂移引起的误差是逐渐累积的，因此，每单位时间内就要求有很多脉冲数用来消除零偏引起的输出变化。这些误差脉冲累积在计算机中，而计算机则记录了作为敏感元件敏感的姿态变化的全部脉冲。本节的目的就在于分析这种影响并且定义这些误差脉冲周期 t_0 与漂移量的函数关系。

分析零偏影响的一般系统如图 2-3 所示，图中假定零偏

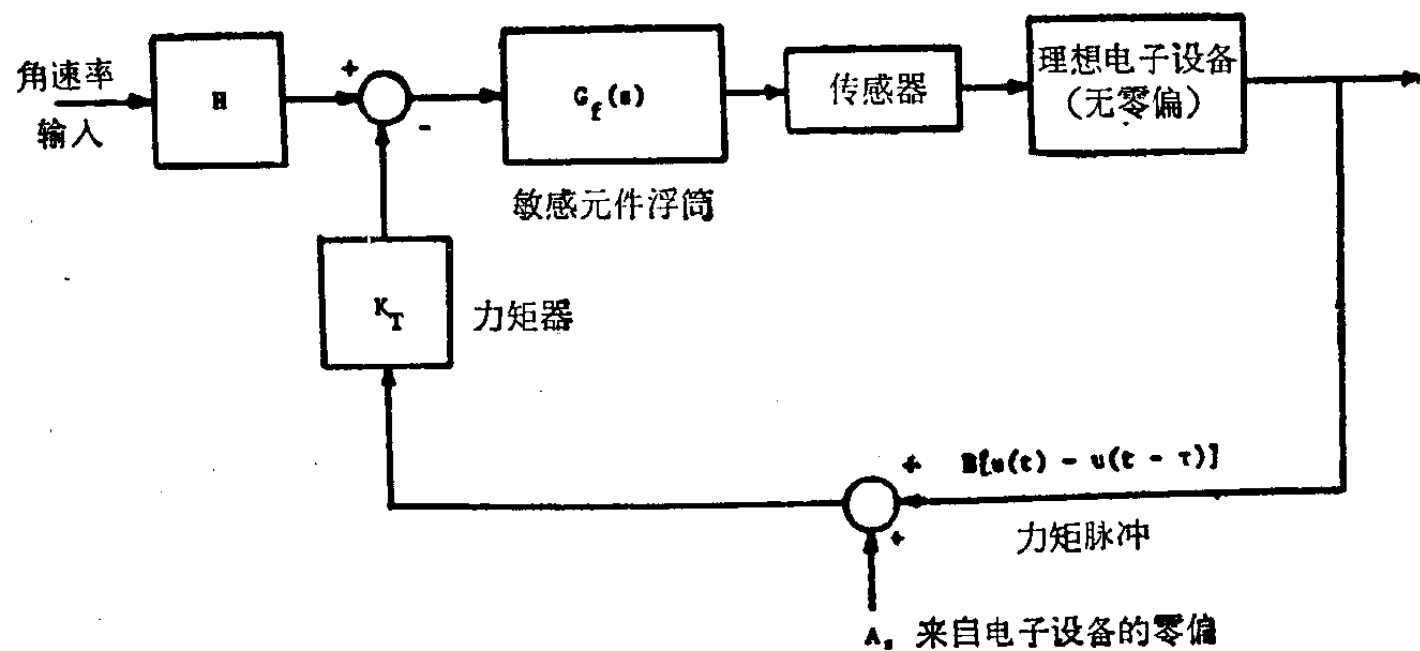


图 2-3 有零偏误差的再平衡回路

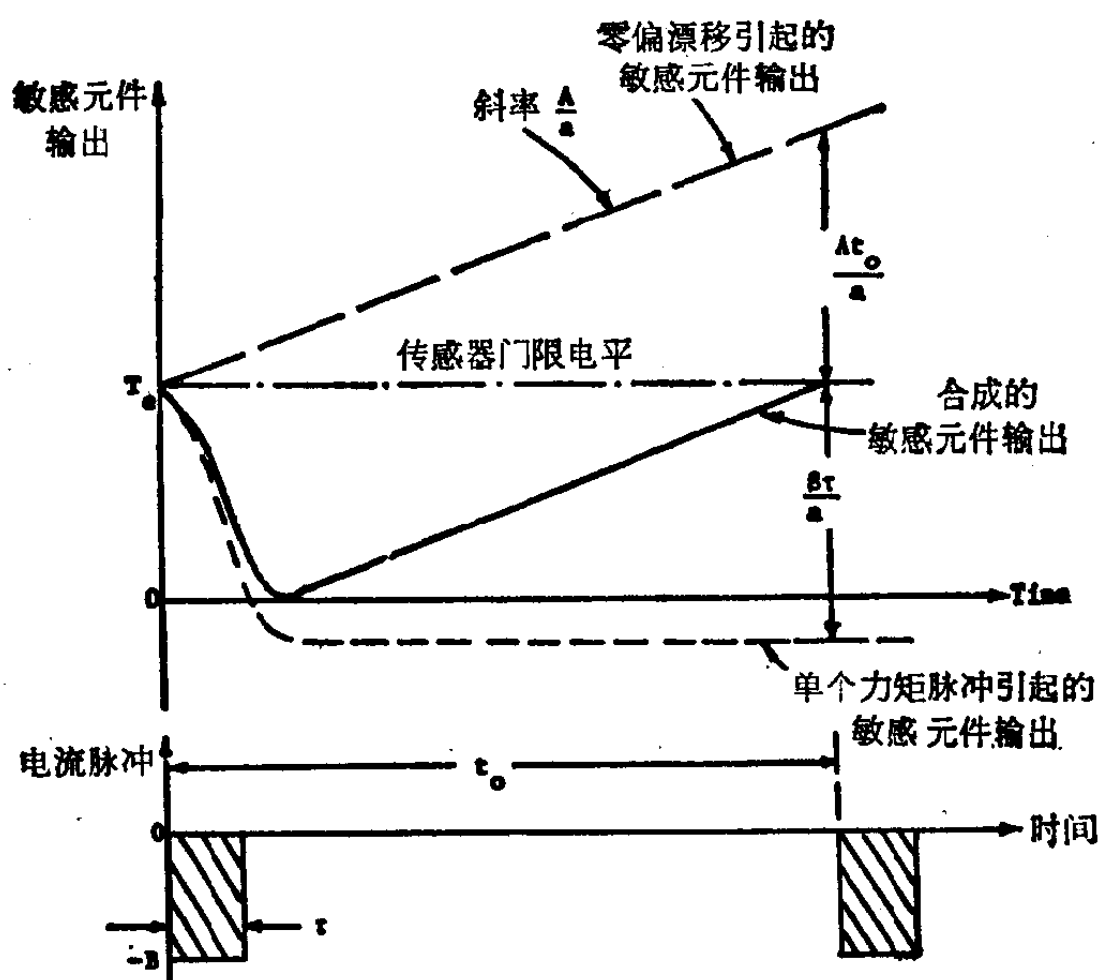


图 2-4 静态的敏感元件输出

是一个常值 A 。在求解 t_0 时我们将讨论两种类型的分析方法。如果电子网络或传感器有一个门限值 T_c ，每当零偏漂移引起的敏感元件的响应等于门限值时将出现一个脉冲。第二种分析方法是假定零输入条件下具有这样的零偏漂移，在 t_0 时输出轴波形的有效面积等于零。

方法 1

给定一个等于门限值的初始响应，会出现一个能将敏感元件响应值返回到检波器极限范围内的力矩脉冲，如图 2-4 所示。因此，当脉冲引起的响应和零偏漂移之和再一次等于 T_c 的时刻，就相当于 t_0 。这就是说，满足下列方程的时间 t_0 就是零偏误差引起的误差脉冲的周期。

$$T_c + A * g_s(t) - B[u(t) - u(t - \tau)] * g_s(t) = T_c \quad (2-1)$$

式中“*”为实褶积运算， B 为脉冲高度。

方程(2-1)还可写成：

$$A * g_s(t) - B[u(t) - u(t - \tau)] * g_s(t) = 0 \quad (2-2)$$

现在可将描述门限值的方程简化为

$$\frac{A}{as^2} - \frac{B(1 - e^{-sr})}{s^2(s + a)} = 0 \Big|_{t=t_0} \quad (2-3)$$

上式在时间域中还可写成

$$\begin{aligned} \frac{At}{a} - \left[\frac{B}{a}t - \frac{B}{a^2} + \frac{B}{a^2} e^{-ar} \right] u(t) + \left[\frac{B}{a}(t - \tau) \right. \\ \left. - \frac{B}{a^2} + \frac{B}{a^2} e^{-a(t-\tau)} \right] u(t - \tau) = 0 \Big|_{t=t_0} \end{aligned} \quad (2-4)$$

忽略瞬态项，在时间 t_0 写出这方程

$$\frac{A}{a} t_0 - \frac{B}{a} t_0 + \frac{B}{a} (t_0 - \tau) = 0 \quad (2-5)$$

对 t_0 求解可以得到方程(2-6)