

航空仪表工艺文集



第一輯

周安石、浦迈俊、肖之中 主編

国防工业出版社

航空仪表工艺文集

第一輯

周安石、浦迈俊、肖之中 主編



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

这本文集共有专题論文十八篇，广泛地介绍了航空仪表零件、元件的制造和仪表装配、調整、試驗等方面的問題，其中約有一半是关于陀螺仪工艺方面的問題。

本书对从事航空仪表生产与研究工作的工程技术人员很有参考价值；对高等工业院校仪表专业的教师及高年级学生亦有所裨益。

航空仪表工艺文集

第 一 輯

周安石、浦迈俊、肖之中 主編

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可延出字第 071 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印張 $9\frac{9}{16}$ 246 千字

1965 年12月第一版 1965 年12月第一次印刷 印数：0,001—1,170册

統一书号：15034·1043 定价：(科六) 1.40元

前 言

随着我国国防建设事业的迅速发展，航空仪表工业也正在以大跃进的步伐向前迈进。为了适应这种形势的需要，给有关生产、科研设计和教学单位提供一些技术参考资料，我们编辑了航空仪表工艺文集。本文集旨在介绍有关航空仪表零件、元件的制造和仪表装配、调整、试验等方面的問題。这一輯的内容大多是陀螺仪工艺方面的文章。

文集中部分文章系译自国外有关文献和杂志，也有部分文章是根据笔者心得和参考国外有关文献编写而成。由于时间仓促和水平所限，文章中难免有不恰当或錯誤之处，敬希讀者批評指正。

在本文集的选編和审稿过程中，承蒙有关单位同志們的大力支持并提供了很多宝贵意見，在这里謹致以謝意。

文集中的大部分插图系由董其中同志所描繪。

編 譯 者

1965年6月

目 录

前 言	3
1. 航空陀螺仪的生产及其发展动向	5
2. 同心度及其对支承工作的影响	26
3. 陀螺仪表万向支架轴承装配问题的探讨	67
4. 由万向支架轴承的摩擦引起的陀螺仪的漂 移和采用旋轉式轴承来减小此漂移	89
5. 小型陀螺仪用精密动平衡机	101
6. 改善陀螺马达动不平衡的途径	119
7. 陀螺仪活动系统的静平衡	125
8. 陀螺马达的静不平衡对陀螺仪性能的影响	146
9. 陀螺马达装配工艺中的几个问题	159
10. 微型感应电动机制造精度的研究	175
11. 指示式同步传动装置的工艺误差	192
12. 綫繞环形电位計制造的精度分析	203
13. 测量小力矩的精密力矩天平	227
14. 浮子陀螺仪专用液体的充填质量	241
15. 仪表装配精度的分析	250
16. 测量陀螺仪漂移的新技术	267
17. 万向支架悬挂零件加工工艺基础	273
18. 論航空陀螺仪表万向支架框架 同心度的檢驗方法	288

航空陀螺仪的生产及其发展动向

周 安 石

一、陀螺仪生产的一些动态

在现代飞机、导弹和宇宙飞行器的控制系统中，陀螺仪是一种非常重要的敏感元件和探测仪器。随着航空技术和星际航行事业的迅速发展，陀螺仪的应用日益广泛，品种亦日益增多。在很多国家里，陀螺仪的生产都得到了迅速的发展。同时，由于对飞行器控制系统的准确度要求日益提高，因而对陀螺仪技术性能的指标亦愈来愈加严格。所以，近些年来，在某些国家里，正在大力地发展高精度陀螺仪的生产。

陀螺仪的精确度，一般系以陀螺仪的漂移速度为标准来衡量。因此，其精度等级，可以按其漂移速度的大小来划分。目前，国际上对陀螺仪精度等级的划分方法并不统一，而且各个国家对其精度等级亦无严格的规定。根据当前陀螺仪的生产与应用情况来看，按表1所提供的分级方法是比较适当的。

表1 陀螺仪的精度等级与应用范围

精度等级	漂移速度 (度/小时)	应 用 范 围
粗精度的	40~150	早期用的陀螺仪、射击用微分陀螺仪和其它短时间工作的陀螺仪
低精度的	5~40	普通飞机和战术性导弹用的陀螺仪
中等精度的	0.5~5	高速飞机和中、近程导弹用的陀螺仪以及某些航海陀螺仪
高精度的	0.5~0.1; 0.1~0.001	远程飞机、远程导弹和潜艇用的陀螺仪 (惯性导航用)
超高精度的	10^{-4} ~ 10^{-9}	星际导航用陀螺仪和长期潜伏的潜艇用的陀螺仪

显然，陀螺仪的精度愈高，则其零件的加工精度与组合件的装配精度以及其相应的检测仪器和测试设备的精度也必然会要求愈高。因此，有些国家也按零件加工及其装配精度来划分仪表的精度。例如，在苏联，将表1中所指低精度的和中等精度的陀螺仪皆列为二级精度的仪表；而高精度陀螺仪则列为一级精度（或一级以上）的仪表。

陀螺仪的精度愈高，则其制造成本也将相应地增加。例如，美国制造的低精度陀螺仪每个价值200~2500美元；中等精度的陀螺仪每个价值2500~6000美元；高精度陀螺仪每个价值6000~20000美元，有的甚至价值更高。因此，这些不同精度等级的陀螺仪也常被相应地称为低价陀螺仪、中等价值的陀螺仪和高价陀螺仪。

目前，在各个国家里，除了生产各种型式的低精度和中等精度的陀螺仪以外，同时还进行各种高精度陀螺仪的生产、试制与研究工作。其中包括有：液浮式陀螺仪、气动支承式陀螺仪、电磁悬式陀螺仪、静电悬浮式陀螺仪、非浮动式的高精度陀螺仪、音叉式的和旋转式的振动陀螺仪、超电导的陀螺仪、核子陀螺仪和超高精度的静止式惯性体仪表等。

上述各种高精度陀螺仪中，从液浮式陀螺仪的生产发展最为迅速。而液浮式陀螺仪中，又以二自由度微分陀螺和积分陀螺的生产更为广泛和比较成熟。这主要是由于二自由度液浮式陀螺仪的结构比较简单，在工艺上比较容易实现。目前，苏、美、英等国皆有这种陀螺仪的正常生产。虽然三自由度的液浮式陀螺仪早就用于航海罗盘中，而且它的使用性能也优于二自由度者。但因其小型化和减轻重量等方面受到限制，且其工艺过程亦比较复杂，成本较高。所以在航空导航系统中，不如二自由度液浮式陀螺仪应用得广泛。

近几年来，气动支承的陀螺仪也在迅速地发展着。气动支承有两种形式，即静力气动支承与动力气动支承。前者是用压力源

来形成流体静压以支持轴颈；后者不需压力源，而是靠轴颈与轴承之间的相对运动所形成的气膜压力来支持轴颈的。

在美国，对于液浮式陀螺仪与气动支承式陀螺仪的发展，有着两派不同的意见。美国陆军弹道导弹局（ABMA）主张发展气动支承的陀螺仪，因其认为气动支承在理论上能完全消除库伦摩擦，而使仪表有可能达到极高的精度和解除由于磨损的寿命限，是惯性导航用陀螺仪的最优方案；而且它不需要复杂的保温装置（液浮式陀螺仪需要精密的保温装置）。麻省理工学院（MIT）仪表研究室则主张发展液浮式陀螺仪。其理由是液浮式陀螺仪的工艺过程较简单、易于实现；而且它也能满足高精度惯性稳定平台的要求；此外，对于静力气动支承式陀螺仪，还需要增设压力源装置和气体过滤系统的缺点。这两种方案的发展前途如何，还有待进一步的实践，方能作出结论。但是，对于陀螺马达转子采用动力气动支承，而带框架的浮体采用液浮支承的方案已经受到了很大的重视，它将是一种很有前途的结构形式。在这种结构中，为了避免马达起动与停转时支承受到磨损，可以采用精度很高的陶瓷轴承。这种轴承具有很高的硬度和稳定性，而且可以大大地减低杂音与振动。此外，在动力气动支承中采用辅助的磁性悬浮也可以避免马达起动与停转时的磨损。

电磁悬浮式陀螺仪，一般也同时是半液浮式的。这种陀螺仪已经出现有二自由度的和三自由度的，并皆已获得一定的发展。尤其是一些精度要求不十分高的陀螺仪，其电磁支承较易实现，因而已有较多的应用。但是，对于漂移速度要求极小的高精度陀螺仪，要求其电磁支承具有极小的剩余电磁有害力矩和保持非常稳定的磁场强度。而这一点往往会成为工艺过程之难处。

非浮动式高精度陀螺仪，一般系采用附加的机械装置来补偿仪表的干扰力矩（例如用摇摆支承装置来减小支承的摩擦；或用附加旋转框架来平衡绕转子轴的不平衡力矩），以提高仪表的精度（据报导，这类陀螺仪的漂移速度可达 $0.25 \sim 0.5$ 度/小时）。这种

仪表的机械加工与机械装配的工作量较大，并有增大仪表体积和重量的缺点。

前述其它各种高精度陀螺仪，在近些年来，皆已相继开始了研究和试制。从原理上讲，这些陀螺仪应能获得极小的漂移速度。同时，它们往往还带有高质量的随动系统或补偿电路，甚至用计算技术装备的修正装置来补偿仪表的误差，从而使仪表达达到极高的精确度。尤其是静止式的惯性体仪表，预计可达 $10^{-4} \sim 10^{-9}$ 的漂移速度。这些指标，估计十年之内可付诸实现。

二、陀螺仪结构的技术要求

陀螺仪的结构取决于它的功用与相应的性能指标。不同用途的陀螺仪具有不同的结构形式与要求。但它们亦具有共同的特点。总的说来，陀螺仪一般皆系由陀螺马达、陀螺悬挂装置、输电装置、修正装置和壳体、外罩等组成；复杂的陀螺仪中，还有同步传输系统、减速传动装置、减震装置和其它辅助装置等；二自由度的陀螺仪往往还设有阻尼装置；直读式陀螺仪中还需要有刻度盘等指示系统；在某些陀螺仪中，为了避免盘旋、侧滚等特技飞行时给仪表带来误差而设有锁紧机构或其它装置；对于一些新型的高精度陀螺仪，还需要设置相应的特殊装置和高准确性的补偿电路和随动系统等。

各种类型的陀螺仪以及陀螺仪的各个组成部分，虽然各有其不同的技术要求，但可以将其结构要求的基本特点归纳为以下几个方面：

（一）加工精度的要求

欲使陀螺仪的反应灵敏而准确，那么首先要求其零件的加工精度比较高才能得到满足。前面已经提到，低精度的和中等精度的陀螺仪一般皆为二级标准（日用手表的精确度为三级标准），而高精度陀螺仪则需达到一级或一级以上的精确度。应该指出，所谓陀螺仪的高精度要求并非指其全部零件和全部尺寸，而只是指

其中某些关键零件的关键尺寸的要求比較严格而言。例如，各支承处的軸、孔尺寸和其它各种配合尺寸，內、外环軸（或孔）的同心度、垂直度和共面度，齒輪和减速机构以及其它机械傳动机构（如支承搖摆机构、仪表鎖紧机构等）的零件的精度，馬达和同步器靜子和轉子的內、外徑及槽距的精度，某些导电零件和阻尼器的精度，浮动式陀螺仪的浮筒或浮球的精度等。至于一般的几何尺寸有七級（中国标准）左右的精度就已經足够了。

实际上，对一級或二級精度的陀螺仪，其零件精度要求的界限并不是很严格的。因为，某些二級精度的仪表亦有个别关键零件要求一級精度者，而一級精度的仪表亦可能有某些关键零件只要求二級精度。

关键零件配合表面的光洁度要求也是很高的，至少应达到 $\nabla\nabla\nabla 7 \sim \nabla\nabla\nabla 9$ ；要求高者应达到 $\nabla\nabla\nabla\nabla 10 \sim \nabla\nabla\nabla\nabla 12$ ，甚至 $\nabla\nabla\nabla\nabla 13$ 以上。

（二）平衡精度的要求

为了保証陀螺仪工作的准确性、稳定性和可靠性，对其活动組合件皆有靜平衡或动平衡的要求。例如陀螺組合件（带陀螺馬达的內环組合件）和万向組合件需要进行靜平衡；对于高速旋轉的陀螺馬达轉子則应进行动平衡。平衡的好坏，在很大程度上决定着陀螺仪的性能（影响漂移速度或指示精度和仪表寿命）。同时，对于一些高精度的陀螺仪来讲，只有进一步提高平衡精度才能进一步减小其漂移速度。例如，高精度的浮动式陀螺仪的浮体組合件就要求有极高的平衡精度，才能滿足其极小的漂移速度的性能要求。

普通航空陀螺仪（指低精度的和中等精度的陀螺仪）的陀螺組合件和万向組合件的靜平衡要求，一般可以允許有 $0.2 \sim 1$ 克·厘米的剩余不平衡力矩（或 $2 \sim 10$ 微米的偏心值）。对于高精度的陀螺仪來說，其活动組合件的靜平衡要求就要严格多了，例如某些浮动式陀螺仪的浮体組合件，不允許超过 $0.5 \sim 1$ 毫克·厘米的

不平衡力矩。

关于陀螺马达的动平衡要求，在一般情况下，其不平衡度允许有 $0.2 \sim 0.8$ 微米的偏心值（ $0.01 \sim 0.1$ 克·厘米的剩余不平衡力矩）。对于某些高精度的陀螺马达，其动平衡的精度要比上述数值提高五倍至十倍。

对于已经平衡好的组合件，还应该用平衡机或特殊的检测设备来检查其平衡度是否符合要求。而且，在组合件最后装入仪表以后，还要在通电的工作状态下，从检查仪表性能的过程中，对平衡质量作最后的鉴定。

（三）摩擦力矩的要求

为了保证陀螺仪的灵敏、准确等性能的要求，就必须对其结构中各活动支承部分有严格的摩擦力矩的要求。同时，只有在把摩擦力矩限制在一定数值以下，平衡体的不平衡度才能体现出来。支承的摩擦力矩愈小，可以达到的静平衡度也愈高。当摩擦力矩太大时，则根本无法鉴别其平衡的好坏。

陀螺仪的摩擦力矩要求，系与陀螺仪本身的轻重和不同程度的装配阶段有关。对于低精度和中等精度的陀螺仪来说，其陀螺组合件在万向支架内的摩擦力矩允许在 $0.2 \sim 1$ 克·厘米以内；万向组合件在壳体內的摩擦力矩允许不大于 $3 \sim 5$ 克·厘米；在有复杂的输电装置和同步传输系统的情况下，可以允许万向组合件在壳体内（总装以后）的摩擦力矩达 10 克·厘米左右。对于某些大型的陀螺仪，其摩擦力矩可允许达到几十、甚至几百个克·厘米。对于高精度陀螺仪来说，其摩擦力矩的要求就极其严格了。例如某些浮动式积分陀螺仪，其浮体组合件的摩擦力矩不允许大于 0.01 毫克·厘米。从设计观点出发，希望浮体组合件在壳体內的摩擦力矩最好能够达到趋近于零的境地。

要想满足陀螺仪的摩擦力矩要求，首先要求支承部分具有较高的几何尺寸、几何形状的精度、表面光洁度和硬度，并在仪表装配和工作过程中保持这样的要求。同时，还应该保证陀螺组合

件与万向組合件符合重量公差的要求。此外，为了使陀螺仪在常溫及高、低溫下，皆能保証摩擦力矩不影响仪表的性能，必須規定組合件在支承間要有活动間隙。

(四) 装配精度的要求

在确定产品結構的同时，必須确定各个零件、組合件之間的相对位置，并要提出其相对位置所必要的准确程度，才能保証仪表所要求的精度和性能指标。例如，軸、孔配合要求保持一定的公隙或公盈；要对装配式的支承軸或支承孔提出同心度或偏摆的要求；各种旋轉的組合件要求規定其最大允許的徑向跳動量、最大允許的端面偏摆和活动部分在支承間所应保持的軸向活动間隙；对于一些电磁組合件还必须規定其合理的工作气隙或間隙等。这些，都需要在装配以后得到保証。因此，在产品結構設計时，必須根据其性能指标規定結構的最后装配精度要求。并根据此精度要求进行装配尺寸鏈的計算，从而对各組合件的装配精度和零件的制造精度提出要求。因此，装配精度的要求应与該产品的零件制造精度相适应。普通航空陀螺仪中，对于一些关键性的装配环节要求有二級（精密产品要求一級或一級以上）或相当于二級（或一級）的装配精度。对于一般性的装配环节，在装配精度方面的要求并不严格，但要求各个装配环节都必須是可靠的。

装配精度的保証，首先取决于零件的制造精度与光洁度；在装配过程中，則取决于工人的操作技术和装配夹具的质量；同时，工作地的清洁程度也是保証装配质量的重要因素。

(五) 可靠性的要求

为了使陀螺仪在使用过程中可靠地工作，必須从結構上提出一些要求来予以保証。例如，在一定振幅和頻率的外界振动和冲击下，以及在其它特殊环境中，皆要保証各种导电装置与訊号傳輸装置中活动接触元件之間的接触可靠性和各个零件、組合件之間的各种“連接”的可靠性以及各种机械性能、物理性质的稳定性等。从而保証仪表在規定的寿命期間內正常地工作。

为了保証仪表在正常工作环境和恶劣的工作条件下皆能正常地工作，要对仪表提出进行絕緣、抗电、耐湿、抗振、耐冲击和高、低溫等試驗的要求。例如，对普通航空陀螺仪来說，工作在电源电压为 40 伏以下的仪表及其元件，在常溫 ($20 \pm 5^\circ\text{C}$)、正常相对湿度为 30~80% 的条件下，其絕緣电阻不应小于 50~100 兆欧（对組合件）或 20~50 兆欧（对整个仪表）；抗电試驗条件一般規定为在 500 伏、50 周、0.5 千伏安的交流电下进行击穿試驗和火花放电試驗；在 95~98% 的相对湿度下經過 1~2 昼夜，其絕緣电阻不小于 1~2（或 2~5）兆欧；在 1.3 g 的加速度、50~200 周（或 200 周以上）的振动頻率下进行長時間（100~250 小时）的抗振試驗（只作“定期檢查”）；某些陀螺仪还要在 3~10g 的加速度下进行冲击試驗；此外，各种陀螺仪皆应在 $\pm 50 \pm 5^\circ\text{C}$ 和 $-60 \pm 5^\circ\text{C}$ 的高、低溫下进行各种性能試驗来鉴定其工作的可靠性。

对于某些要在特殊条件下工作的仪表来說，在可靠性方面提出了更高的要求。例如，有些仪表要求作 20g 以上的加速度試驗（离心試驗），作 15~30g 以上的抗振試驗和 60~100g 的冲击試驗，要求在高溫（150~200 $^\circ\text{C}$ ）下經受核輻射；除有很严格的防尘、抗湿要求以外，还要求有防細菌的能力。

（六）体积与重量的要求

航空陀螺仪都要求其体积小、重量輕。例如飞机上用的一般方向仪与地平仪皆具有比較复杂的結構，但其体积只有 1.5~2.5 立升左右，其重量亦只有 2~4 公斤左右。而用于远 程導彈慣性导航系統航的陀螺仪，其体积与重量的要求就更加严格了。例如某型积分仪的体积只有 0.08 立升左右；重量只有 0.2 公斤左右，因此被称为袖珍式的微型陀螺仪。

由此可知，航空陀螺仪的結構一定要求它輕巧而緊湊。这样，就必然会出现大量尺寸小、形状复杂的零件和組合件。为了減輕仪表重量，一些結構性零件一般皆使用輕合金。例如，陀螺房、

平衡环、壳体和各种支架等一般系使用鋁或鎂的合金（很多仪表中已广泛采用薄壁鋼料制件，新型仪表中已开始用鈹或其它材料的制件），它們的壁厚在 1~6 毫米的範圍內（以 2~3 毫米者居多）；各种平面零件的厚度，一般在 0.1~2.5 毫米以內（以 0.15~1.5 毫米者为最多），最薄者达 0.01~0.02 毫米，厚者可达 4 毫米以上，它們的形状很多都是非常古怪的；又如陀螺仪有許多鋼质小軸，一般采用不銹鋼制成，它們的直徑一般为 2~6 毫米，細者只有 0.5~1 毫米，这类零件的細长比一般較小 而 精度要求頗高。像上面所列举的这类零件，必然給工艺过程带来不少的麻煩。

以上就是航空陀螺仪在結構上的几个主要方面的要求。除此以外，在某些情况下，不同类型的仪表可能有其特殊要求。例如，有些陀螺仪有严格的气密性要求、自动保温的要求以及其它特殊的結構要求和特殊物理条件的要求等，这主要是根据这些仪表的原理、用途和工作条件的要求提出来的。本文只闡述了上述一些共同要求，其它特殊要求就不予以論述了。

應該指出，产品結構的工艺性，对于要求“质量第一”，要求生产周期短而批量不大的航空陀螺仪來說，具有很重要的意义。因为在滿足仪表使用要求和构造要求的前提下，改善結構的工艺性，能够簡化工艺过程，降低成本和提高产品质量。从而获得很大的技术經濟效果。实际的事例証明，在很多情况下，改善結構工艺性所收到的效果，往往不次于有时甚至还超过采用新的工艺过程所带来的技术經濟效果。

三、陀螺仪生产中的某些工艺問題

陀螺仪的生产与解决一系列的复杂工艺問題密切相关。随着产品精确度和結構复杂程度的提高，給工艺过程带来新的困难也是不可避免的。尤其是一些新型陀螺仪的出現，工艺部門必然要采取一些新的措施与新的方法，以适应新結構的需要。

这里就陀螺仪生产中一些具有共性或普遍性的工艺问题，概要地介绍于下：

(一) 毛坯制造中的问题

航空陀螺仪中，有大量铸造零件。例如仪表的壳体、底座、平衡环、陀螺房和一些支架等，这些零件都是采用压铸的方法制成的毛坯（马达的鼠笼亦有用压铸者）。因此，压铸工艺在陀螺仪零件的毛坯制造中一向占有很大比重。因此，保证压铸制件的质量和提其合格率，乃是毛坯制造中的重要任务。为此，在生产中要正确地选择压铸工艺参数和采用合理的模具结构。同时，推荐采用真空压铸，试用铸造性能更好的铝、镁合金和改善压铸件的工艺性，乃是提高压铸质量的有效途径。此外，随着新技术的发展，应该更进一步提高压铸件的准确度与光洁度以扩大其应用范围。

近年来，框架、壳体这类零件，除用铝、镁合金制作以外，已开始广泛采用薄壁（1~3毫米）的钢料、铜料和钹料等的制件。这是为了提高结构的刚性，以减小零件在加工、时效、温度变化和在惯性力作用下的变形。这些材料的熔点较高，不便用压铸方法来制造。因此需要采用其它工艺方法。例如，薄壁钢料的框架和壳体已经开始用熔模铸造和薄壳铸造来制造；一些黄铜和低碳钢的薄壁框架和壳体，已经开始广泛采用冲压成形（拉深工艺）的方法来取得；钹制件则应采用粉末冶金、真空铸造或特种成形等方法来制造，由此可见，在框架、壳体等零件的毛坯制造中，已经开始采用各种不同的工艺方法，从而逐步打破普通压铸工艺的独特优势。

(二) 冲压与机械加工的精度问题

冲压工艺与机械加工工艺是陀螺仪零件制造中的两种主要工艺方法。从数量而言，以冲压零件的数量为最多；从劳动量来讲，以机械加工的工作量为最大。由于陀螺仪（尤其是高精度陀螺仪）的一些关键零件在尺寸、形状的精确度以及表面光洁度方面要求

很严格，因此，要求冲压与机械加工工艺具有很高的水平，才能与之相适应。例如，在某些高精度陀螺仪中，陀螺马达轉子軸頸的公差要求在 $1\sim 2$ 微米以內，甚至要求在 0.5 微米以下；同心度的公差要求不超过 $1\sim 5$ 微米，最严格的也有要求在 0.5 微米以下的；马达或同步器靜子、轉子直徑的公差要求在 $5\sim 10$ 微米以下，其叠片槽距分度的公差要求在 $\pm 4'\sim \pm 6'$ 以下；不少零件的光洁度要求都是很高的（見前述数据）。所有类似这样一些要求，都必须依靠完善的冲压与机械加工的工艺过程才能予以保証。

提高冲压零件的精度，以滿足产品結構要求和更多地代替机械加工的工作，这是冲压工艺发展中的总趋势。要做到这一点，除要改进目前已經比較成熟的冲压方法和提高冲模的制造精度以外，还必须着重研究如何提高精密冲裁、整修、校正、精压和冷挤等工序的效果，以扩大它們的应用范围。此外，冲压工艺发展中的另一重要问题是縮短冲模的生产周期和提高其使用寿命。因为这是为滿足科学研究、新品試制、保証冲压质量与提高經濟效果的必要措施。目前，在冲模制造中所采用的成型磨削、絲电极靠模加工、耐磨的硬质合金模具、使用低熔点合金（或环氧树脂）来固定阴（或阳）模以及适用于短生产周期的鑄造鋅合金阴模等先进方法，皆已显見其成效。

陀螺仪零件的高精度与高光洁度要求，絕大部分是靠机械加工来达到的。为了滿足制造这些精密零件的需要（尤其是为适应高精度陀螺仪生产的需要），进一步提高机械加工工艺的水平以滿足零件的高精度与高光洁度，乃是陀螺仪制造工艺的主要发展方向之一。目前，国外的情况是，強調采用精密的机床設備和保持文明生产的条件，是保証零件精密要求的基本条件。框架加工方面，多年来一直是推荐采用組合机床进行加工。框架檢驗也是研究的中心問題，目前有机械的、电学的、光学的和气动 的測量方法，但皆未見其成熟可靠的方案。在支承孔（或軸）的加工方面，采用比較法进行自动配对加工的方法已显見成效。对于某些精密零件往

往要采用超精工序来进行最后的加工。例如，浮动式陀螺仪的支承小轴要采用摩擦抛光；气动支承的轴颈与轴承要用超精研配以达到 0.02~0.04 毫米（对于静力支承）或 0.0025~0.005 毫米（对于动力支承）的均匀气膜，并保证 $\nabla\nabla\nabla\nabla 13 \sim \nabla\nabla\nabla\nabla 14$ 的表面光洁度。气动支承的轴承孔亦可用珩磨的方法来加工。据报导，精密的陶瓷轴承可以用金刚石的加工工具加工至公差为 0.08~0.1 微米的准确度。而静电悬浮式陀螺仪的球形转子（无框架式的）要加工至公差为 0.1~0.2 微米的尺寸精度。这些，都是不容易做到的。

（三）零件与组合件的清理问题

为了防止零件与组合件上的毛刺与灰尘混到仪表中，以免其影响仪表的工作性能。因此，在陀螺仪（尤其是高精度陀螺仪）生产中，对零件与组合件的清理也是一件很重要的工作。

陀螺仪的零件和组合件皆应去除毛刺并用汽油和酒精等清洗剂进行清洗。而且，还必须用特制的容器或玻璃钟罩予以妥善地保存。

高精度陀螺仪的所有零件都要在专用的小房间里彻底地去除毛刺。各种机械加工的零件应在 20~30 倍的双筒显微镜下，用牙科医用工具或磨料橡皮型杆来去除毛刺。对于各种铝质和铜质零件还应进行液体抛光，使之获得像缎面一样光洁的表面并消除其表面的刀迹与刮痕，这样能便于对零件进行有效的清洗（因为刀迹与刮痕里容易积存灰尘的颗粒而不易洗去）。

由于用高导磁材料（如铁镍合金）所制成的同步器叠片不宜用机械方法来去除毛刺。因而目前已推荐采用化学的方法。这种方法是把叠片放在加有微量硫酸和过氧化氢的溶液中进行。为了使零件的边缘（即带毛刺处）比其它表面能更多地被浸蚀，而采取超声振动的措施来达到这个目的。这种做法，已经获得良好的效果。

当马达、同步器的叠片组经过加热、加压而胶合好以后，剩余的树脂将伸展在极掌之间，并有薄层树脂附着在组合件的外