

TURBINAS DE SIMETRÍA DINÁMICA

Campo de aplicación

La presente invención hace referencia al diseño y construcción de rotores para
5 turbomáquinas en general que deban funcionar a la vez como bomba y como motor sin
estar condicionado al uso de un determinado fluido de trabajo ni aplicación específica
como, por ejemplo, motores de turbina de gas.

Estado de la técnica

10 Fabricar motores más eficientes, más ligeros, más compactos y más simples es una
meta constantemente perseguida por los ingenieros. Uno de los factores más limitantes
para el diseño de turbinas de gas es la alta temperatura de combustión necesaria para un
buen rendimiento, pero que afecta negativamente a la resistencia de los materiales. De
las diversas técnicas que han sido propuestas para optimizar los motores de turbina de
15 gas, son de relevancia para entender esta invención, por sus paralelismos, aquellas en
las que se explota la idea de emplear los álabes huecos de una turbina axial
convencional también como compresor radial haciendo circular el aire fresco a través de
su interior antes de entrar en el combustor para después redirigir mediante un bucle los
gases calientes procedentes del combustor contra los álabes de la turbina axial. De este
20 modo se consigue refrigerar los álabes de la turbina que son simultáneamente bomba
radial y motor axial.

Esta idea del rotor radial-axial viene de antiguo y las siguientes patentes son ejemplos
en los que se utiliza con diversas particularidades: US1603966A(1926),
US1640784A(1927), US1702264A(1929) otorgadas a C. Lorenzen; US2611241A(1952)
25 otorgada a T. R. Schulz; US3283509A(1966) otorgada a H. Nitsch; US6430917B1(2002)
otorgada a D. A. Platts; US2003192303A1(2003) otorgada a M. A. Paul. Una variación
bastante obvia de esta configuración de rotor radial-axial consistiría en invertir el sentido
del flujo de gases quedando en este caso la configuración como un compresor axial y una
turbina radial centrípeta. Otra variación es la que sugiere D. A. Platts en su patente
30 US6430917B1(2002), desarrollada después en la patente US7044718B1(2006), para
transformar su rotor radial-axial en uno radial-radial. Esta idea consiste básicamente en
eliminar el carácter axial de los álabes de la turbina y desviar su flujo para hacerlo más
perpendicular al eje consiguiendo que la configuración quede como un compresor radial
que intercala sus canales con los de una turbina igualmente radial. Asimismo existen
35 aplicaciones, como la explicada en WO2006060003A2(2006), en las que una pala axial
hueca también es aprovechada como bomba radial, pero aquí solo es una ayuda a la

compresión ya que después no se redirige el flujo procedente del combustor contra dicha pala axial.

Tradicionalmente el diseño de motores de turbina de gas contempla tres bloques funcionales principales claramente separados: el compresor, el combustor y la turbina de gases calientes. Aproximadamente el 50% de la potencia obtenida por la turbina debe ser empleada para accionar el compresor. Lo habitual es que sea un eje sólido el que transmita esa potencia desde la turbina hasta el compresor. Las patentes citadas anteriormente como ejemplo emplean otra técnica para transmitir esa potencia pues son los propios gases procedentes del combustor los que empujan directamente al compresor aprovechando la posibilidad que ofrecen los álabes huecos para conducir dos corrientes de fluido distintas que se cruzan. Este tipo de diseños presenta varias ventajas: se acorta la longitud y el peso del motor eliminando la necesidad de un eje que transmita la potencia desde la turbina hasta el compresor, se refrigeran los álabes de la turbina permitiendo mayores temperaturas y menor proporción de exceso de aire, la propia acción de refrigeración implica un efecto recuperador de calor que mejora la eficiencia térmica, los álabes están sometidos a una menor tensión mecánica gracias a la compensación parcial de la presión del fluido por ambas caras de sus superficies activas.

Concebir un álabe hueco como un tubo por el que también puede circular radialmente el aire es una idea útil y muy intuitiva, pero que impone ciertas limitaciones potencialmente incómodas pues condiciona definitivamente la configuración de la máquina al disponer la salida de aire comprimido hacia la periferia y, a la vez, condiciona las transiciones del flujo radial desde y hacia el rotor por la geometría tubular de los álabes.

Es el objetivo de la presente invención proporcionar una estrategia de diseño y fabricación alternativa a la de los álabes huecos anteriormente comentada que, aun siendo menos intuitiva, una vez entendida, resulta funcionalmente más natural y versátil, con arquitecturas considerablemente simplificadas y perfiles de entrada y salida suaves sin la necesidad de añadir elementos extraños para eliminar discontinuidades en el flujo. Es igualmente el objetivo de la presente invención permitir soluciones constructivas innovadoras respecto a la de los álabes huecos eliminando los condicionamientos de la compresión radial y de las formas convencionales de álabes existentes en el estado de la técnica.

Con el criterio de simetría dinámica se renuncia a la metodología clásica de diseño 2D y se aprovecha la potencia de las herramientas de ingeniería actuales para concentrar el esfuerzo tecnológico en el diseño de la geometría 3D no convencional de dos tipos de lámina alabeada y su posterior manufactura. Su empleo consigue rotores intrínsecamente refrigerados y dinámicamente compensados cuya estructura se construye sencillamente

mediante la adecuada unión de tan solo esos dos tipos de lámina. A la vez minimiza la necesidad de elementos macizos para transmitir esfuerzos mecánicos y aporta flexibilidad en el diseño de las turbomáquinas en las que se integran. Su constitución les confiere una gran resistencia a las presiones ejercidas por los fluidos que se comprimen y se expanden permitiendo aumentar la carga de cada etapa al emplear geometrías con curvas muy pronunciadas y mayores velocidades. La obligación de cruzar el fluido que se comprime y el que se expande en el mismo rotor no implica necesariamente tener que provisionar secciones sensiblemente mayores que en un rotor convencional, pues lo que se consigue con la simetría dinámica es aprovechar los espacios sin uso que quedarían en el interior de los álabes del rotor convencional, sobre todo si se pretenden usar geometrías de alta presión. Al contrario de lo que ocurre con los rotores de álabes huecos, los rotores de láminas de simetría dinámica facilitan la concepción de turbomáquinas con varias etapas de compresión-expansión sin tener que aumentar el diámetro de las turbomáquinas gracias a que con esta filosofía el diseño no se ve comprometido por la necesidad de la compresión o expansión radial. La menor inercia de los rotores invita a emplear como procedimiento de arranque la proyección de un chorro de aire comprimido directamente en las cámaras de combustión pudiendo así reemplazar otros sistemas convencionales más pesados y lentos.

20 **Utilidad industrial**

Si bien las ventajas pretendidas son deseables en cualquier aplicación de motores de turbina de gas, la presente invención puede ser particularmente útil en la fabricación de turbinas para pequeñas potencias y microturbinas, unidades de generación de energía portátiles, generación de energía eléctrica distribuida, accionamiento de vehículos no tripulados, motores no reutilizables como el de un misil de crucero, motores auxiliares para sustentación vertical en aviones VTOL, generadores primarios en la propulsión híbrida, motores de turbina de arranque rápido, turbosoplantes, etc.

Descripción de la invención

30 Se considera superficie de simetría dinámica teórica a aquella que tiene una forma alabeada tal que permite conducir una corriente de fluido por una de sus caras describiendo una determinada trayectoria y ejerciendo sobre ella unos determinados esfuerzos, mientras que al mismo tiempo permite conducir otra corriente de fluido por su otra cara describiendo otra trayectoria simétrica a la primera y ejerciendo sobre ella otros
35 esfuerzos simétricos a los primeros.

La presente invención describe el diseño de rotores de turbina fabricados simplemente mediante la unión de dos tipos de láminas, uno de presión (superficie activa) y otro de

succión (superficie pasiva), cuyas formas no convencionales se derivan del criterio de simetría dinámica. Gracias a esta técnica el rotor funciona a la vez como bomba y como motor y se reduce sustancialmente la necesidad de materiales estructurales para su construcción. Cualquier superficie del rotor está en contacto con el fluido que se expande por una de sus caras y también está en contacto con el fluido que se comprime por la otra cara. Uno de los tipos de láminas desempeña la función de superficie activa para la compresión por una de sus caras y para la expansión por la otra. El otro tipo de lámina desempeña la función de superficie pasiva para la compresión por una de sus caras y para la expansión por la otra. Debido a las especiales características geométricas de los rotores de láminas de simetría dinámica no es posible hablar del concepto clásico de álabe como elemento constructivo. El rotor se construye tan solo uniendo adecuadamente entre sí una secuencia de láminas en la que se alternan de forma sucesiva las activas y las pasivas de modo que entre ellas van formándose dos tipos de canales igualmente alternativos, uno destinado a que circule el fluido que se comprime y el otro, adyacente, destinado a que circule el fluido que se expande. Ambos tipos de láminas son muy semejantes en su forma por lo que pueden ser obtenidos mediante procesos de fabricación análogos. Las láminas deben unirse entre sí por sus bordes mediante soldadura, unión adhesiva, ranuras de ensamblaje en rotores desmontables o cualquier método conveniente. No se descarta la posibilidad de emplear algún método de fabricación que permita la obtención del rotor de una sola pieza directamente sin tener que recurrir a la fabricación de láminas y su posterior unión.

Partiendo del hecho objetivo de que tanto el compresor como la turbina de gases calientes son turbomáquinas muy similares que responden a los mismos fenómenos físicos, el concepto de simetría dinámica busca que el comportamiento dinámico del fluido que se comprime por una de las caras de la superficie activa sea similar al que presenta el fluido que se expande por la otra cara de esa misma superficie activa. Para que haya una transferencia de energía entre el rotor y el fluido se necesitan movimiento (giro) y fuerza (presión). Las presiones que surgen entre la superficie y el fluido son causadas por aceleraciones del mismo, es decir, cambios de velocidad en el flujo tanto en módulo como en dirección. El cambio de velocidad en el fluido puede ser debido a la curvatura de la superficie, como en el flujo axial, o al cambio de velocidad de la propia superficie a distintas distancias del eje de giro, como en el flujo radial, y puede ser debido a una mezcla de ambos. El hecho de que el tipo de flujo sea predominantemente radial o axial es algo meramente circunstancial y no altera la aplicación del criterio de simetría dinámica. Para el flujo axial la superficie de simetría dinámica tiene doble curvatura y su forma se asemeja a una silla de montar a caballo. Para flujo radial la superficie de simetría dinámica podría ser plana ya que los cambios de velocidad no dependen de la

existencia de curvatura sino de la mayor o menor cercanía al eje de giro. La superficie de simetría dinámica correspondiente al flujo mixto es como la del flujo axial pues geométricamente manda el hecho de que exista curvatura. Desde el punto de vista geométrico, la superficie de simetría dinámica correspondiente al flujo radial se puede
5 considerar un caso límite de la del flujo axial en el que la curvatura es nula. En las aplicaciones reales estas superficies difícilmente presentarán simetría geométrica debido a la disparidad entre las condiciones termodinámicas del fluido que se expande y las del fluido que se comprime. Las superficies reales de las láminas con las que finalmente se construirán los rotores se derivarán del criterio teórico de simetría dinámica atendiendo a
10 requisitos de resistencia, optimización de mecánica de fluidos, transferencia de calor e idoneidad según la aplicación concreta que se esté diseñando. No se presume que las láminas deban tener un espesor uniforme, circunstancia que dependerá de las necesidades de diseño en cada caso.

Independientemente de la disposición del rotor, se entiende por flujo axial aquel en el
15 que la curvatura de la superficie es la causante principal de las aceleraciones en el fluido que favorecen la transferencia de energía entre el rotor y el fluido; se entiende por flujo radial aquel en el que la variación de la distancia al eje de giro es la causante principal de las aceleraciones en el fluido que favorecen la transferencia de energía entre el rotor y el fluido; se entiende por flujo mixto aquel en el que tanto la curvatura de la superficie como
20 la variación de la distancia al eje de giro son las causantes de las aceleraciones en el fluido que favorecen la transferencia de energía entre el rotor y el fluido.

Puesto que los rotores no solo interactúan con el fluido sino que están integrados en una máquina, será necesario, en general, que estén adaptados para desempeñar otras funciones por lo que: opcionalmente las láminas pueden contar con apéndices en partes
25 concretas de sus bordes a modo de ala de montaje que sirven como cojinete, como sello de estanqueidad, como equilibradores, como puntos de anclaje para las láminas en rotores desmontables o para albergar otros accesorios; opcionalmente pueden añadirse anillos de montaje a la estructura del rotor en partes concretas que sirven como elemento continuo de refuerzo, como cojinete, como sello de estanqueidad, como equilibradores,
30 como chasis de anclaje para las láminas en rotores desmontables o para albergar otros accesorios; opcionalmente la superficie de las láminas puede prolongarse más allá de los bordes de unión entre ellas formando aletas que desempeñen alguna función fluidodinámica.

Con la finalidad de ayudar a comprender mejor lo ya explicado se proporcionan dibujos
35 y ejemplos que no deben entenderse como una limitación a la aplicabilidad de la invención. Debido a que se trata de geometrías no convencionales, las láminas de simetría dinámica se representan con su superficie mallada para percibir mejor su forma

tridimensional y se ofrecen diversas perspectivas de las mismas piezas. Para simplificar las ilustraciones algunas piezas que normalmente serían huecas o aligeradas se han representado macizas y se han omitido a propósito elementos de fijación, cojinetes, sellos, servicios de combustible, difusores, inductores, cámaras de combustión y en general detalles, dispositivos y sistemas cuya descripción no es el objeto de la presente invención y que no aportarían información relevante para comprender la exposición a un experto en la materia pues su uso le resultaría evidente. Otras ventajas y características novedosas se establecerán posteriormente o resultarán aparentes para un experto en la materia o podrían ser aprendidas por la puesta en práctica de la invención.

Breve descripción de los dibujos

Fig. 1 y 2: Perspectivas de una superficie activa de simetría dinámica para flujo axial o mixto.

Fig. 3 y 4: Perspectivas de una superficie pasiva de simetría dinámica para flujo axial o mixto.

Fig. 5, 6, 7 y 8: Perspectivas de los canales que se forman entre las superficies activas y pasivas de simetría dinámica para flujo axial o mixto.

Fig. 9: Opciones de unión entre superficies activa y pasiva de simetría dinámica.

Fig. 10 , 11, 12, 13 y 14: Perspectivas de un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo axial o mixto.

Fig. 15: Perspectiva de un motor básico que integra un rotor de láminas de simetría dinámica.

Fig. 16: Vista esquemática del motor de la figura 15.

Fig. 17: Vista transversal de la línea de flujo de una voluta en espiral.

Fig. 18 y 19: Perspectivas de una superficie pasiva de simetría dinámica para flujo axial o mixto con sus alas de montaje.

Fig. 20: Perspectiva de una superficie pasiva de simetría dinámica para flujo axial o mixto con alas de montaje y anillos de montaje.

Fig. 21: Detalle de la zona en la que un rotor de simetría dinámica toca la estructura de la turbomáquina en la que se integra.

Fig. 22: Secciones de posibles realizaciones de alas y anillos de montaje.

Fig. 23 y 24: Posibles técnicas de ensamblaje de superficies de simetría dinámica en un rotor desmontable.

Fig. 25: Vista esquemática de un generador eléctrico accionado por un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo axial.

Fig. 26: Vista esquemática de un motor turbo-hélice que combina un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo axial con etapas de álabes convencionales.

Fig. 27: Vista esquemática de un motor turbo-ventilador que combina dos rotores de láminas de simetría dinámica para flujo axial.

Fig. 28 y 29: Perspectivas de una superficie activa de uno de los rotores de la figura 27.

5 Fig. 30 y 31: Perspectivas de la unión de una superficie pasiva y dos activas de uno de los rotores de la figura 27.

Fig. 32 y 33: Perspectivas de uno de los rotores de la figura 27.

Fig. 34: Vista esquemática de un motor accionado por un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo mixto.

10 Fig. 35: Vista esquemática de un motor turbo-ventilador accionado por un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo mixto.

Fig. 36 y 37: Perspectivas del rotor de la figura 34.

Fig. 38 y 39: Perspectivas del rotor de la figura 35.

15 Fig. 40 y 41: Perspectivas de la unión de una superficie pasiva y dos activas del rotor de la figura 35.

Fig. 42: Vista esquemática de un motor turbo-hélice que combina dos rotores de láminas de simetría dinámica para flujo axial y un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo mixto.

Fig. 43 y 44: Perspectivas de uno de los rotores de flujo axial de la figura 42.

20 Fig. 45: Vista esquemática de una turbomáquina que integra un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo radial elemental.

Fig. 46 y 47: Perspectivas de una superficie activa del rotor de la figura 45.

Fig. 48 y 49: Perspectivas del rotor de la figura 45.

25 Fig. 50: Vista esquemática de una turbomáquina que integra un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo radial con adaptación al flujo axial de la zona cercana al eje.

Fig. 51 y 52: Perspectivas de una superficie activa del rotor de la figura 50.

Fig. 53 y 54: Perspectivas del rotor de la figura 50.

Fig. 55, 56, 57 y 58: Perspectivas de superficies activa y pasiva de simetría dinámica para flujo radial con aletas de adaptación al flujo axial de la zona cercana al eje.

30 Fig. 59 y 60: Perspectivas de un rotor de láminas de simetría dinámica para flujo radial con aletas de adaptación al flujo axial de la zona cercana al eje.

Descripción detallada de los dibujos

35 Las ilustraciones aportadas van a contribuir a un mejor entendimiento del concepto de simetría dinámica visualizando desde varias perspectivas las geometrías correspondientes a las láminas con las que se construyen los rotores, tanto separadas como unidas entre sí, ya se trate de flujo axial, radial o mixto. Los bordes de unión entre

superficie activa y pasiva se muestran como aristas para facilitar su distinción, pero en la práctica también podrían ser redondeados. Asimismo se esquematizan diversas opciones de realización que constituyen una muestra suficiente de las amplias posibilidades constructivas ofrecidas por esta estrategia de diseño.

5 Las figuras 1 y 2 muestran perspectivas de una superficie activa de simetría dinámica 1 en las que también pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. Nótese cómo dichas trayectorias curvas implican la aparición de presión entre la superficie y el fluido. En este caso se trataría de una superficie de simetría dinámica para flujo axial o mixto, es
10 decir, la geometría debe forzar al fluido a describir una trayectoria curva. Obsérvese en este ejemplo teórico cómo la geometría y las trayectorias presentan simetría respecto a una recta imaginaria que pasara por dos vértices opuestos de la superficie.

Las figuras 3 y 4 muestran perspectivas de una superficie pasiva de simetría dinámica 4 en las que también pueden verse representadas mediante hileras de flechas las
15 trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. Nótese cómo dichas trayectorias curvas implican la aparición de succión entre la superficie y el fluido. Al igual que ocurre en los álabes clásicos de flujo axial, la superficie pasiva de simetría dinámica tiene una curvatura más pronunciada que la superficie activa.

Las figuras 5 y 6 muestran perspectivas de la unión de una superficie pasiva de
20 simetría dinámica 4 y dos superficies activas de simetría dinámica 1. Estas vistas permiten apreciar cómo se forman los canales por los que han de circular tanto el flujo que se expande 2 como el flujo que se comprime 3. Nótese cómo la superficie pasiva 4 se une por dos de sus bordes con una de las superficies activas 1, y por otros dos con la otra superficie activa 1. De forma recíproca les sucede a las activas respecto a las
25 pasivas. Como puede verse en este ejemplo, la superficie activa de simetría dinámica tendrá todos sus bordes unidos a alguna superficie pasiva, sin embargo, no sucede lo mismo con la superficie pasiva de simetría dinámica que tendrá algunos bordes libres. Esto es así por mera conveniencia geométrica, pero sería perfectamente concebible que fueran ambas superficies o solo la superficie activa la que tuviera esos bordes libres,
30 aunque ello engendraría geometrías un poco más forzadas. El hecho de que un canal sea de compresión o expansión no depende de la geometría de las superficies sino de cómo se configure la máquina entera y del sentido de giro del rotor. Un mismo rotor podría considerarse de flujo axial en una determinada configuración de la máquina, y de flujo mixto en otra configuración diferente si en ella sí se aprovecha la componente radial
35 del flujo para la compresión o la expansión. Para formar una mejor idea de cómo queda configurado un canal, las figuras 7 y 8 muestran perspectivas de un conjunto de

secciones 5 de uno de dichos canales a la vez que representan la trayectoria 6 del fluido al circular por el interior del canal.

Las superficies de simetría dinámica se representan mediante un mallado que facilita la percepción de su geometría tridimensional. Este mallado está compuesto por dos familias de curvas que simplemente son generatrices usadas para crear la geometría y no deben confundirse con las trayectorias reales que describe el fluido por cada una de sus caras, aunque puedan ser parecidas. Como puede intuirse por la propia geometría de los canales, cuando el fluido circule por su interior tenderá a concentrarse más en las zonas de los bordes de unión entre la superficie activa y pasiva por lo que deben estar bien unidos. La figura 9 ilustra una sección transversal de un canal. En este dibujo se detallan diversas opciones de unión de la superficie pasiva 7 y la activa 8. Así, la opción 9 representa a una unión soldada o adhesiva, mientras que las opciones 10 a 13 representan posibles tipos de empalme a emplear en rotores desmontables. También podrían idearse uniones similares en el caso de que fueran bordes redondeados en vez de bordes en arista viva.

Las figuras 10 y 11 muestran perspectivas de un rotor para flujo axial o mixto en el que solo se han colocado las superficies activas 1. Las figuras 12 y 13 muestran perspectivas de ese mismo rotor, pero habiendo colocado ya las superficies pasivas 4. Nótese cómo las superficies pasivas 4 prácticamente ocultan a las superficies activas 1. La figura 14 ilustra cómo se irían uniendo secuencialmente y de manera alternativa las superficies activas 1 y las pasivas 4 para la fabricación de un rotor.

La figura 15 muestra la perspectiva de un motor de turbina de gas elemental cortado axialmente para poder ver la disposición del rotor de láminas de simetría dinámica 15 para flujo axial, su sentido de giro 21 y las flechas que indican el recorrido de los gases en su interior. En la figura 16 se muestra la sección esquemática de ese mismo motor. El aire fresco 14 entra en el motor y llega hasta el rotor 15 pasando a través de sus canales de compresión. Después sale del rotor en el punto 16 parcialmente comprimido y con una gran energía cinética. Mediante una voluta en espiral, el aire es conducido hasta la entrada del combustor 17 a donde llega totalmente comprimido y con poca energía cinética. Sale del combustor por 18 tras suministrarle energía térmica y mediante otra voluta en espiral es conducido hasta 19 en donde ha perdido parte de su presión y ha ganado una gran energía cinética. Después entra en los canales de expansión del rotor 15 donde cede parte de su energía al rotor para finalmente salir del motor por 20. En las figuras 15 y 16 no se han representado las volutas que comunican el rotor con el combustor, pero su sección transversal sería una espiral como, por ejemplo, la indicada en la figura 17. Nótese que el rotor se ha calificado como de flujo axial puesto que en esta configuración no se aprovecha de ninguna forma la componente radial del flujo ya que el

flujo que se comprime circula hacia el eje de giro y el que se expande se aleja del mismo. Los puntos indicados con el número 22 son los puntos de contacto del rotor con la estructura del motor. En esos puntos debería existir algún sistema de sellado que impidiera la indebida circulación de gases fuera de los canales del rotor y, también, algún mecanismo de apoyo que permitiera transmitir esfuerzos entre el rotor y la estructura del motor. Estas necesidades dan pie al empleo de alas de montaje en la estructura de las láminas de simetría dinámica cuyas funciones son explicadas en las siguientes figuras.

Las figuras 18 y 19 muestran perspectivas de una superficie pasiva de simetría dinámica en la que se han añadido sobre sus bordes libres unos apéndices 22 denominados alas de montaje. Estas alas de montaje son simplemente prolongaciones de la estructura de la superficie que pueden ser empleadas de diversas formas según la conveniencia de la aplicación. Están presentes en la superficie pasiva porque tiene bordes libres, pero podrían estar en la activa si también los tuviera. Normalmente servirán como cojinete para transmitir esfuerzos a la estructura de la turbomáquina en la que el rotor se integra, también como superficie contra la que realizar un sello de estanqueidad, como soporte para accesorios que deban ser accionados directamente por el rotor y como punto de anclaje con otros elementos. Cuando la turbomáquina integre varios rotores es probable que tanto el sellado como la transmisión de esfuerzos deban realizarse entre los propios rotores además de entre los rotores y la turbomáquina. Adicionalmente las alas de montaje acogerán los contrapesos que se deriven de la operación de equilibrado del rotor.

La figura 20 muestra una perspectiva en la que se visualiza una superficie pasiva de simetría dinámica 4 en la que dos de sus alas de montaje 22 sirven para unirla a unos anillos 23. Si bien, desde el punto de vista operativo, esos anillos no son imprescindibles, se hacen convenientes por tratarse de elementos estructuralmente continuos que pueden conformarse con diseños más elaborados exigiendo para ello tan solo un torneado. Obviamente los anillos podrían unirse a las láminas sin requerir la existencia de alas de montaje. Pueden ser empleados para desempeñar las mismas funciones que las alas de montaje y, en particular, como chasis de anclaje para las superficies de simetría dinámica en rotores desmontables. Una técnica razonable para la construcción de rotores desmontables para flujo axial o mixto será utilizar como elemento constructivo al conjunto resultante de unir mediante soldadura una superficie activa, que no tiene alas de montaje, y una superficie pasiva, que sí tiene alas de montaje en sus bordes libres.

Ya sean alas de montaje o anillos, estos elementos normalmente estarán alojados en el interior de cavidades construidas a tal efecto en la estructura de la turbomáquina en la que se integra el rotor. La figura 21 muestra un croquis de esta zona en un corte axial de una turbomáquina. El rotor de láminas de simetría dinámica 15 tiene alas de montaje 22

unidas a un anillo 23. Dicho conjunto está alojado en una cavidad construida en la estructura 27 de la turbomáquina. Esa cavidad está realizada con una serie de mecanizaciones a modo de sello de estanquidad de tipo laberíntico 24 que impide la comunicación entre el aire fresco 14 que entra en los canales de compresión del rotor 15 y los gases de exhaustación 20 que salen de los canales de expansión del mismo rotor. Tanto el anillo 23 como la estructura de la turbomáquina 27 están conformados de tal manera que poseen una superficie 25 destinada a ejercer de cojinete de fricción para soportar posibles esfuerzos como empujes o fuerzas centrífugas. Adicionalmente, el anillo 23 y la estructura de la turbomáquina 27 están dotados de los accesorios electromagnéticos 26 necesarios para que la turbomáquina funcione como un generador de energía eléctrica.

La figura 22 muestra secciones de posibles configuraciones de alas de montaje, simples a la izquierda, o combinadas con anillo a la derecha. Nótese que las alas de montaje pueden ser diseñadas para desempeñar diversas funciones no siendo imprescindible el uso de anillos.

La figura 23 muestra una vista frontal parcial de un rotor de láminas de simetría dinámica 15 con alas de montaje 22 y anillo 23. En este ejemplo las alas de montaje 22 y el anillo 23, en vez de estar soldados o remachados, están simplemente ensamblados mediante pivotes 28 que encajan en los respectivos agujeros de las alas de montaje 22 consiguiendo así que el rotor sea desmontable. Aunque es una opción poco probable, la figura 24 muestra una vista frontal parcial de un rotor de láminas de simetría dinámica 15 con alas de montaje 22 manufacturadas con un mecanizado especial 29 a fin de poder ensamblar directamente unas a otras sin necesidad de unir las por soldadura o mediante un anillo.

Tras describir la geometría de las superficies de simetría dinámica para flujo axial o mixto, y tras describir cómo se combinan para construir rotores, se presentan a continuación una serie de posibles esquemas de turbomáquinas que integran este tipo de rotores. En las vistas de los rotores se han omitido a propósito los detalles de las alas de montaje y posibles anillos para simplificación.

La figura 25 muestra una sección axial esquemática de un generador eléctrico accionado por un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo axial 15 cuya cámara de combustión 31 está centrada. A través del conducto 33 se suministra combustible e ignición eléctrica a la cámara de combustión 31. El rotor 15 está unido a un anillo 23 al que se han acoplado accesorios para la generación eléctrica 34. Para arrancar el generador existe la posibilidad de hacerlo eléctricamente por medio de los mismos elementos 34 que se usan para la generación. Alternativamente, el generador puede arrancarse insuflando aire comprimido desde una botella a la cámara de combustión a

través del conducto 33 y, una vez arrancado, emplear ese mismo conducto 33 para tomar aire de la entrada de la cámara de combustión y rellenar la botella de aire comprimido accionando válvulas convenientemente dispuestas. El aire fresco 14 entra en el generador y llega hasta el rotor 15 pasando a través de sus canales de compresión. Después sale del rotor y entra en la voluta espiral de compresión 30 que lo conduce hasta la cámara de combustión 31. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y entra en la voluta espiral de expansión 32 que lo conduce hasta el rotor 15. El gas pasa por los canales de expansión del rotor 15 donde cede su energía para finalmente salir del generador por 20.

La figura 26 muestra una sección axial esquemática de un motor turbo-hélice con un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo axial 15 cuya cámara de combustión 31 está centrada. El cuerpo del motor está compuesto por una carcasa exterior 38 y un cuerpo central 40 unidos por un estator 39. Las hélices forman parte de un rotor exterior 37 que en su interior tiene una etapa de álabes convencionales 35 de ayuda a la compresión y otra etapa de álabes convencionales de turbina 36 que accionan todo el rotor exterior mediante los gases de exhaustación. En este caso el rotor de láminas de simetría dinámica 15 sólo se usa para compresión mientras que la potencia útil es obtenida por los álabes 36 del rotor exterior 37. El rotor exterior 37 y el rotor de láminas de simetría dinámica 15 giran en sentidos opuestos. A través del conducto 33 se suministra combustible e ignición eléctrica a la cámara de combustión 31. El motor puede arrancarse insuflando aire comprimido desde una botella a la cámara de combustión a través del conducto 33 y, una vez arrancado, emplear ese mismo conducto 33 para tomar aire de la entrada de la cámara de combustión y rellenar la botella de aire comprimido. El aire fresco 14 es parcialmente acelerado y comprimido por los álabes 35 del rotor exterior 37 y llega hasta el rotor 15 pasando a través de sus canales de compresión. Después sale del rotor 15 y entra en la voluta espiral de compresión 30 que lo conduce hasta la cámara de combustión 31. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y entra en la voluta espiral de expansión 32 que lo conduce hasta el rotor 15. El gas pasa por los canales de expansión del rotor 15 donde cede parte de su energía. Tras salir del rotor 15 incide sobre los álabes de turbina 36 suministrando la potencia útil al rotor exterior 37 para finalmente salir del motor por 20.

La figura 27 muestra una sección axial esquemática de un motor turbo-ventilador cuya cámara de combustión 31 está centrada y que combina dos rotores de láminas de simetría dinámica de flujo axial, uno de ellos 15 para la compresión y el otro 43 para propulsión, ambos rotan en sentidos opuestos. A través del conducto 33 se suministra combustible e ignición eléctrica a la cámara de combustión 31. El motor puede arrancarse insuflando aire comprimido desde una botella a la cámara de combustión a través del

conducto 33 y, una vez arrancado, emplear ese mismo conducto 33 para tomar aire de la entrada de la cámara de combustión y rellenar la botella de aire comprimido. El aire fresco que entra por 14 pasa a través de los canales de compresión del rotor 43. La mayor parte del aire es expulsado por 44 para obtener empuje, la otra parte del aire bombeado se dirige por 41 hacia los canales de compresión del rotor 15. Después sale del rotor 15 y entra en la voluta espiral de compresión 30 que lo conduce hasta la cámara de combustión 31. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y entra en la voluta espiral de expansión 32 que lo conduce hasta el rotor 15. El gas pasa por los canales de expansión del rotor 15 donde cede parte de su energía. Después sale por 42 hacia los canales de expansión del rotor 43 donde cede la energía necesaria para accionarlo y escapa finalmente al exterior por 20. Para separar los conductos 41 y 42 se emplea un anillo 45 que puede girar libre respecto a los rotores. Nótese que no existe ningún elemento de separación para los flujos 44 y 20 que salen del rotor 43 pues su geometría está diseñada expresamente para que sus velocidades sean muy parecidas en el punto 46. En las próximas figuras puede observarse mejor la geometría del rotor de láminas de simetría dinámica 43 que está diseñado para bombear un gran caudal de aire pero imprimiéndole poca velocidad.

Las figuras 28 y 29 muestran perspectivas de una superficie activa de simetría dinámica 1 del rotor 43 de la figura 27. También pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. Nótese cómo la trayectoria de compresión tiene una curvatura poco pronunciada para no proporcionar mucha velocidad al fluido. En este caso se trataría de una superficie de simetría dinámica para flujo axial, es decir, la geometría debe forzar al fluido a describir una trayectoria curva y no se aprovecha la componente radial del flujo ni para la compresión ni para la expansión.

Las figuras 30 y 31 muestran perspectivas de la unión de una superficie pasiva de simetría dinámica 4 y dos superficies activas de simetría dinámica 1 del rotor 43 de la figura 27. Nótese la amplitud del canal de compresión frente al de expansión. En la figura 31 pueden verse señalados los puntos 46 que también se indican en la figura 27. Las figuras 32 y 33 muestran perspectivas del rotor 43 de la figura 27. El sentido de giro está indicado por 21. El punto de vista de la figura 32 permite apreciar mejor las zonas de entrada tanto de los canales de compresión como los de expansión, mientras que el punto de vista de la figura 33 permite apreciar mejor las zonas de salida.

La figura 34 muestra una sección axial esquemática de un motor de turbina de gas accionado por un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo mixto 15 cuya cámara de combustión 31 es anular y ubicada en la periferia del rotor donde también se integran zonas de difusión e inducción. La potencia útil es distribuida por el eje 47 que también

sirve para arrancar el motor. El aire fresco 14 entra en el motor y llega hasta el rotor 15 pasando a través de sus canales de compresión. Después sale del rotor y entra en la cámara de combustión anular 31. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y el gas pasa por los canales de expansión del rotor 15 donde cede su energía para finalmente salir del motor por 20. Como ya se advirtió anteriormente, el rotor de flujo mixto es conceptualmente igual que el de flujo axial y lo único que cambia es la configuración de la máquina que sí permite aprovechar la componente radial del flujo para la compresión y expansión. En figuras posteriores se mostrarán vistas del rotor empleado en esta máquina.

La figura 35 muestra una sección axial esquemática de un motor turbo-ventilador accionado por un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo mixto 15 cuya periferia se comunica con una cámara de combustión externa a través de las volutas 30 y 32. El motor puede arrancarse insuflando aire comprimido desde una botella a la cámara de combustión. El aire fresco que entra por 14 pasa a través de los canales de compresión del rotor 15. La mayor parte del aire es expulsado por 48 para obtener empuje, la otra parte del aire bombeado se dirige a la voluta de compresión 30 y de ahí a la cámara de combustión. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y entra en la voluta de expansión 32 que lo conduce hasta el rotor 15. El gas pasa por los canales de expansión del rotor 15 donde cede su energía y escapa finalmente al exterior por 20. Al aire de empuje 48 se le hace pasar por un estator 49 antes de abandonar el motor. En las próximas figuras puede observarse mejor la geometría del rotor de láminas de simetría dinámica 15 que está diseñado para bombear un gran caudal de aire por su parte central pero imprimiéndole poca velocidad.

Las figuras 36 y 37 muestran perspectivas del rotor 15 de la figura 34. El sentido de giro está indicado por 21. Nótese que no es esencialmente distinto que los ya vistos para flujo axial.

Las figuras 38 y 39 muestran perspectivas del rotor 15 de la figura 35. El sentido de giro está indicado por 21. El punto de vista de la figura 38 permite apreciar mejor las zonas de entrada tanto de los canales de compresión como los de expansión, mientras que el punto de vista de la figura 39 permite apreciar mejor las zonas de salida. Las figuras 40 y 41 muestran perspectivas de la unión de una superficie pasiva de simetría dinámica 4 y dos superficies activas de simetría dinámica 1 del rotor 15 de la figura 35. Nótese la amplitud del canal de compresión frente al de expansión.

La figura 42 muestra una sección axial esquemática de un motor turbo-hélice cuya cámara de combustión 31 está centrada y que combina el uso de un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo mixto 15 con dos rotores de láminas de simetría dinámica de flujo axial 49 y 52. El cuerpo del motor está compuesto por una carcasa exterior 38 y un

cuerpo central 40 unidos por un estator 39. Las hélices forman parte de un rotor exterior 37 que está sólidamente unido a los rotores 49 y 52. En este caso los tres rotores de láminas de simetría dinámica intervienen en la compresión, pero solo los rotores 49 y 52 suministran la potencia útil al rotor exterior 37. El rotor de láminas de simetría dinámica de flujo mixto 15 gira en sentido opuesto al rotor exterior 37 y, por tanto, también respecto a los rotores de láminas de simetría dinámica de flujo axial 49 y 52. A través del conducto 33 se suministra combustible e ignición eléctrica a la cámara de combustión 31. El motor puede arrancarse insuflando aire comprimido desde una botella a la cámara de combustión a través del conducto 33 y, una vez arrancado, emplear ese mismo conducto 33 para tomar aire de la entrada de la cámara de combustión y rellenar la botella de aire comprimido. El aire fresco 14 es parcialmente comprimido por los canales de compresión del rotor 49 saliendo al conducto 50. Después se comprime más pasando a través de los canales de compresión del rotor 15 y sale al conducto 51. A continuación se comprime más pasando a través de los canales de compresión del rotor 52. Después sale del rotor 52 y entra en la voluta espiral de compresión 30 que lo conduce hasta la cámara de combustión 31. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y entra en la voluta espiral de expansión 32 que lo conduce hasta el rotor 49. El gas pasa por los canales de expansión del rotor 49 donde cede parte de su energía al rotor exterior 37 y sale al conducto 53. De ahí pasa a los canales de expansión del rotor 15 donde cede parte de su energía saliendo al conducto 54. Por último pasa a los canales de expansión del rotor 52 suministrando el resto de la potencia útil al rotor exterior 37 para finalmente salir del motor por 20. En las figuras siguientes puede observarse la geometría del rotor de láminas de simetría dinámica 49 para flujo axial cuya peculiaridad es que el flujo de compresión transcurre en un plano muy paralelo al eje mientras que el flujo de expansión transcurre en un plano muy perpendicular al mismo y en sentido opuesto al que sería deseable para aprovechar la componente radial de su movimiento.

Las figuras 43 y 44 muestran perspectivas del rotor 49 de la figura 42. El sentido de giro está indicado por 21.

Una vez que se han ilustrado con suficientes ejemplos posibles realizaciones de rotores de láminas de simetría dinámica para flujo axial o mixto y de turbomáquinas donde pueden integrarse, se pasa a continuación a hacer lo propio con rotores de láminas de simetría dinámica para flujo radial. El flujo radial puede entenderse como un caso límite del flujo mixto en el que la curvatura neta del flujo es nula y, por tanto, sería perfectamente factible un rotor radial diseñado con las mismas técnicas que uno mixto. Sin embargo, la flexibilidad de diseño proporcionada por el criterio de simetría dinámica permite otras soluciones constructivas más ventajosas para el flujo radial. Como se comprobará en las próximas figuras, es posible fabricar un rotor de láminas de simetría

dinámica en el que el flujo que se comprime no tiene que cruzarse forzosamente con el flujo que se expande, y en el que no es necesario que los canales queden completamente formados por la superficie activa y la pasiva.

La figura 45 muestra una sección axial esquemática de una turbomáquina que usa un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo radial 15 para intercambiar energía entre dos corrientes de fluido. El rotor tiene alas de montaje 22 a fin de realizar el sellado contra la carcasa. Las figuras 46 y 47 muestran perspectivas de una superficie activa de simetría dinámica 1 del rotor 15 de la figura 45. También pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. Nótese que en su zona central tanto el flujo que se expande 2 como el que se comprime 3 transcurren aproximadamente paralelos y que sus trayectorias no se cruzan. Las figuras 48 y 49 muestran perspectivas del rotor 15 de la figura 45 señalando algunas superficies activas 1 y pasivas 4. Una de las características más diferenciadoras de este rotor de láminas de simetría dinámica para flujo radial respecto a los de flujo axial o mixto es que los canales de compresión y de expansión no quedan cerrados entre la superficie activa 1 y la pasiva 4 sino que una parte de ellos debe cerrarse por la carcasa de la máquina, tal como se ve en el punto 55 de la figura 45. Es una característica también común en las turbomáquinas radiales convencionales. Esta zona de los canales que se cierra por la carcasa coincide con la zona en la que el flujo que se expande 2 y el que se comprime 3 transcurren aproximadamente paralelos. En referencia a la figura 45, el fluido que se comprime entra en la turbomáquina por 14, cerca del eje de giro, y pasa a los canales de compresión del rotor 15 donde recibe energía al circular radialmente hacia la voluta 56 en la periferia. El fluido que se expande llega por la voluta 57, en la periferia, y pasa a los canales de expansión del rotor 15 donde cede energía al circular radialmente hacia el eje de giro para salir de la turbomáquina por 20. En este ejemplo la geometría de las superficies es muy simple: una superficie activa plana y una superficie pasiva que se aproxima mucho a una superficie reglada. Si bien este diseño es perfectamente factible, puede ser optimizado dotando a las superficies del alabeo adecuado para que se adapte mejor al flujo de tipo axial que predomina en las zonas próximas al eje de giro tal como se muestra en las siguientes figuras.

La figura 50 muestra una sección axial esquemática de una turbomáquina que usa un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo radial 15 para intercambiar energía entre dos corrientes de fluido. Salvo por la geometría del rotor, la turbomáquina es igual que la representada en la figura 45. Las figuras 51 y 52 muestran perspectivas de una superficie activa de simetría dinámica 1 del rotor 15 de la figura 50. También pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. Nótese cómo en este ejemplo la zona de la superficie por la

que entra el flujo que se comprime 3 está abombada a modo de cuchara, al igual que la zona por la que sale el flujo que se expande 2. Las figuras 53 y 54 muestran perspectivas del rotor 15 de la figura 50 señalando algunas superficies activas 1 y pasivas 4. Nótese cómo en este ejemplo tanto las superficies activas 1 como las pasivas 4 tienen bordes libres. Esta misma adaptación al flujo de tipo axial que predomina en las zonas próximas al eje de giro puede conseguirse también mediante el uso de aletas logrando un efecto similar pero con geometrías menos forzadas como se muestra en las siguientes figuras.

Las figuras 55 y 56 muestran perspectivas de una superficie activa de simetría dinámica 1 para un rotor similar al de la turbomáquina de la figura 50. Puede verse representada mediante una hilera de flechas la trayectoria del flujo que se comprime 3. La superficie tiene una prolongación 58 a modo de aleta específicamente dispuesta para adaptarse al flujo axial entrante. Las figuras 57 y 58 muestran perspectivas de la unión de una superficie pasiva de simetría dinámica 4 y una superficie activa de simetría dinámica 1. También pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. La superficie pasiva 4 también incorpora su propia aleta 59 para adaptarse al flujo axial saliente, aunque lo cierto es que ambas aletas podrían estar solo en la superficie activa o solo en la superficie pasiva. Las figuras 59 y 60 muestran perspectivas de un rotor de láminas de simetría dinámica compuesto por las superficies antes descritas. Estas aletas, al contrario que las superficies de simetría dinámica, están bañadas por el mismo fluido por ambas caras, es decir, son una prolongación porque por sí mismas no cumplen el criterio de simetría dinámica, aunque sí lo cumple el resto de la superficie. Podrían usarse igualmente en rotores de láminas de simetría dinámica de flujo axial o mixto, pero son especialmente convenientes para los radiales ya que suele existir una zona donde el flujo es marcadamente axial.

Reivindicaciones

5 Rotores de turbina que funcionan a la vez como bomba y como motor, ya sea con flujo axial, radial o mixto, caracterizados por estar fabricados esencialmente mediante dos tipos de láminas, uno de presión y otro de succión, que al unirlos alternativamente por sus bordes van configurando dos tipos de canales igualmente alternativos, uno destinado a que circule el fluido que se comprime y el otro, adyacente, destinado a que circule el fluido que se expande gracias a estar diseñadas con una geometría especial que se deriva del criterio de simetría dinámica según el cual una superficie de simetría dinámica teórica tiene una forma alabeada tal que permite conducir una corriente de fluido por una de sus caras describiendo una determinada trayectoria y ejerciendo sobre ella unos determinados esfuerzos, mientras que al mismo tiempo permite conducir otra corriente de fluido por su otra cara describiendo otra trayectoria simétrica a la primera y ejerciendo sobre ella otros esfuerzos simétricos a los primeros. Opcionalmente las láminas pueden contar con apéndices en partes concretas de sus bordes a modo de ala de montaje que sirven como cojinete, como sello de estanqueidad, como equilibradores, como puntos de anclaje para las láminas en rotores desmontables o para albergar otros accesorios. Opcionalmente pueden añadirse anillos de montaje a la estructura del rotor en partes concretas que sirven como elemento continuo de refuerzo, como cojinete, como sello de estanqueidad, como equilibradores, como chasis de anclaje para las láminas en rotores desmontables o para albergar otros accesorios. Opcionalmente la superficie de las láminas puede prolongarse más allá de los bordes de unión entre ellas formando aletas que desempeñen alguna función fluidodinámica.

10

15

20

Resumen

Se describe el diseño de rotores de turbina que funcionan a la vez como bomba y como motor, fabricados esencialmente mediante la unión de dos tipos de láminas, uno de presión y otro de succión, cuyas geometrías se derivan del criterio de simetría dinámica según el cual una superficie de simetría dinámica teórica (1) tiene una forma alabeada tal que permite conducir una corriente de fluido (2) por una de sus caras describiendo una determinada trayectoria y ejerciendo sobre ella unos determinados esfuerzos, mientras que al mismo tiempo permite conducir otra corriente de fluido (3) por su otra cara describiendo otra trayectoria simétrica a la primera y ejerciendo sobre ella otros esfuerzos simétricos a los primeros. Se proponen diversas soluciones constructivas comprobando la aplicación del criterio de simetría dinámica al diseño de turbinas de flujo radial, axial o mixto.

FIG. 1

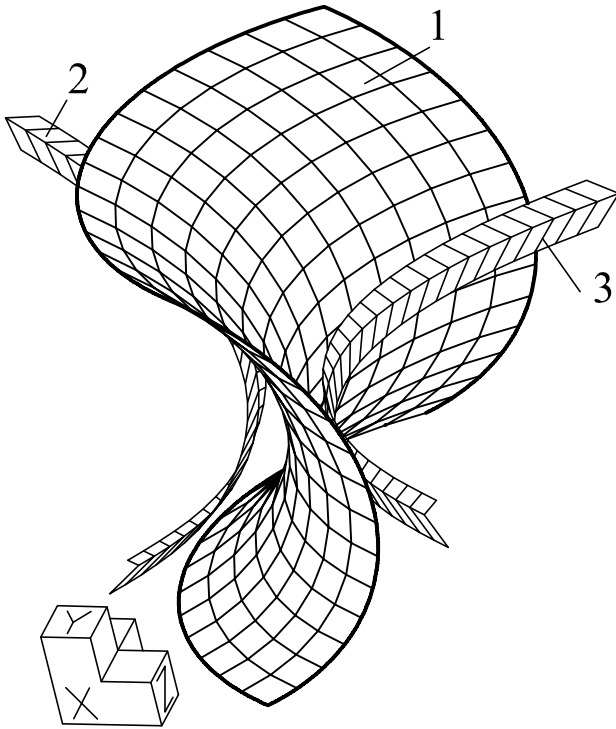


FIG. 2

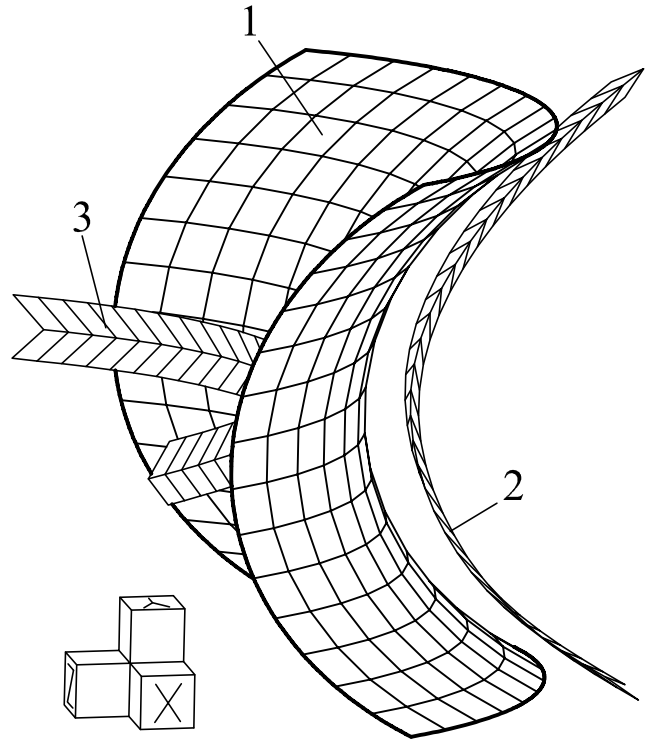


FIG. 3

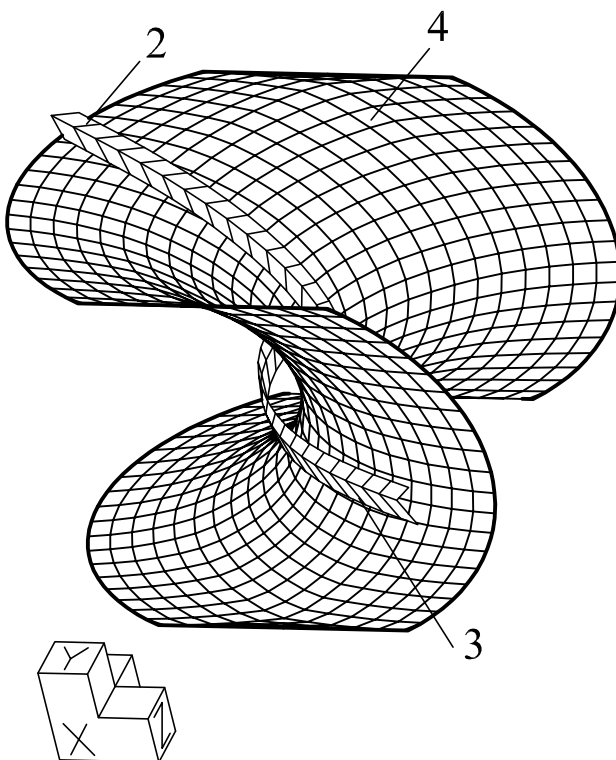


FIG. 4

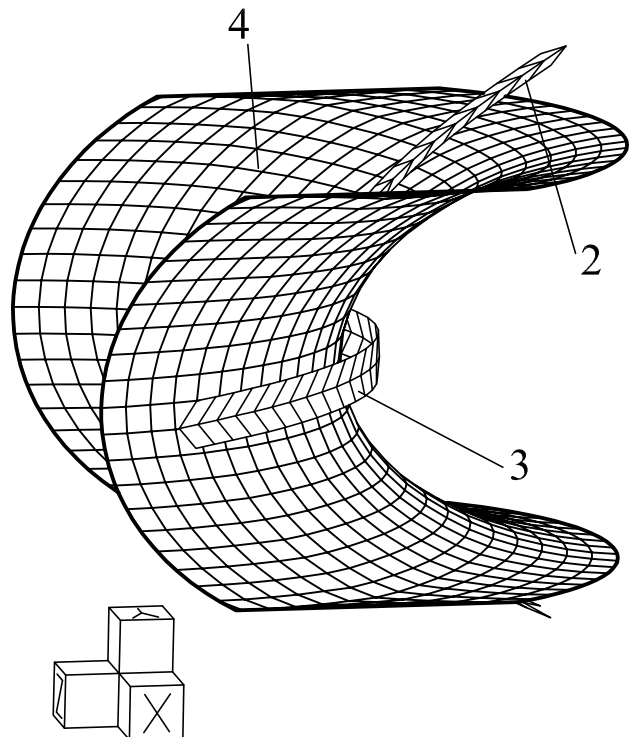


FIG. 5

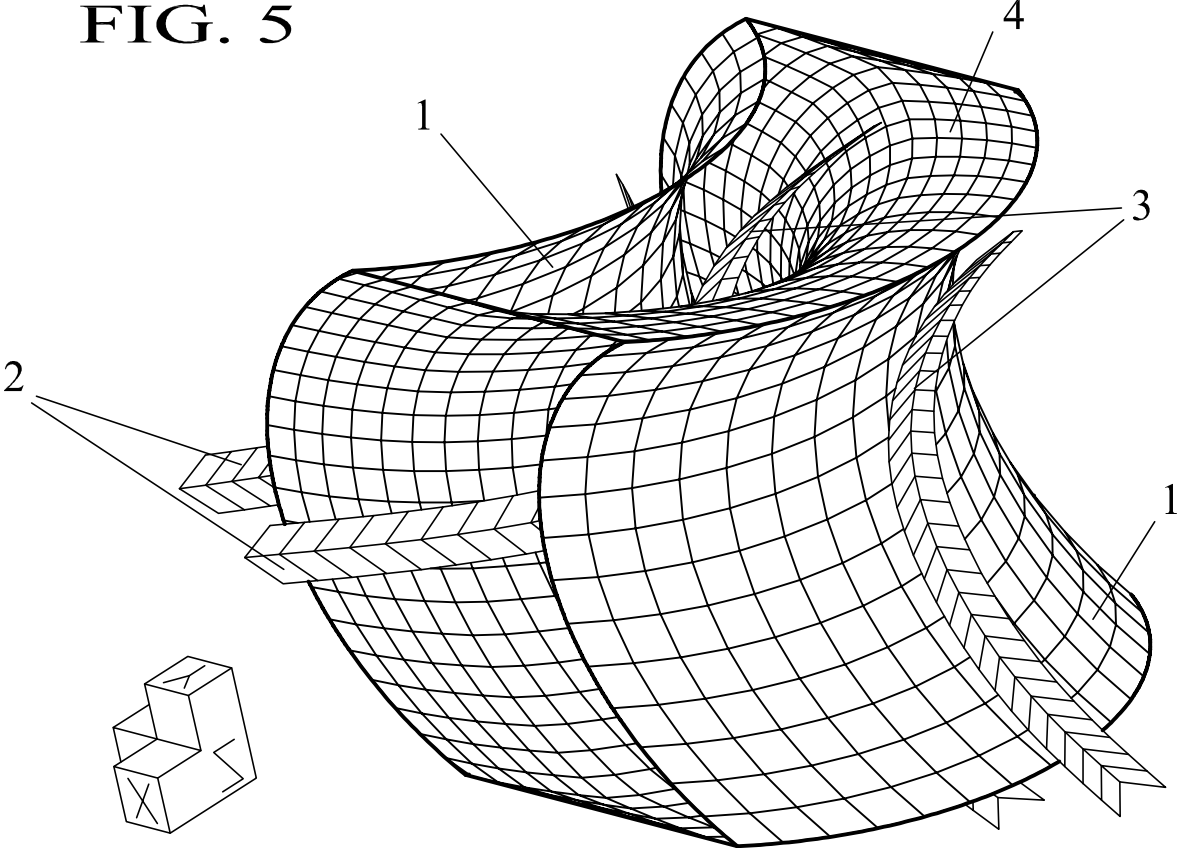
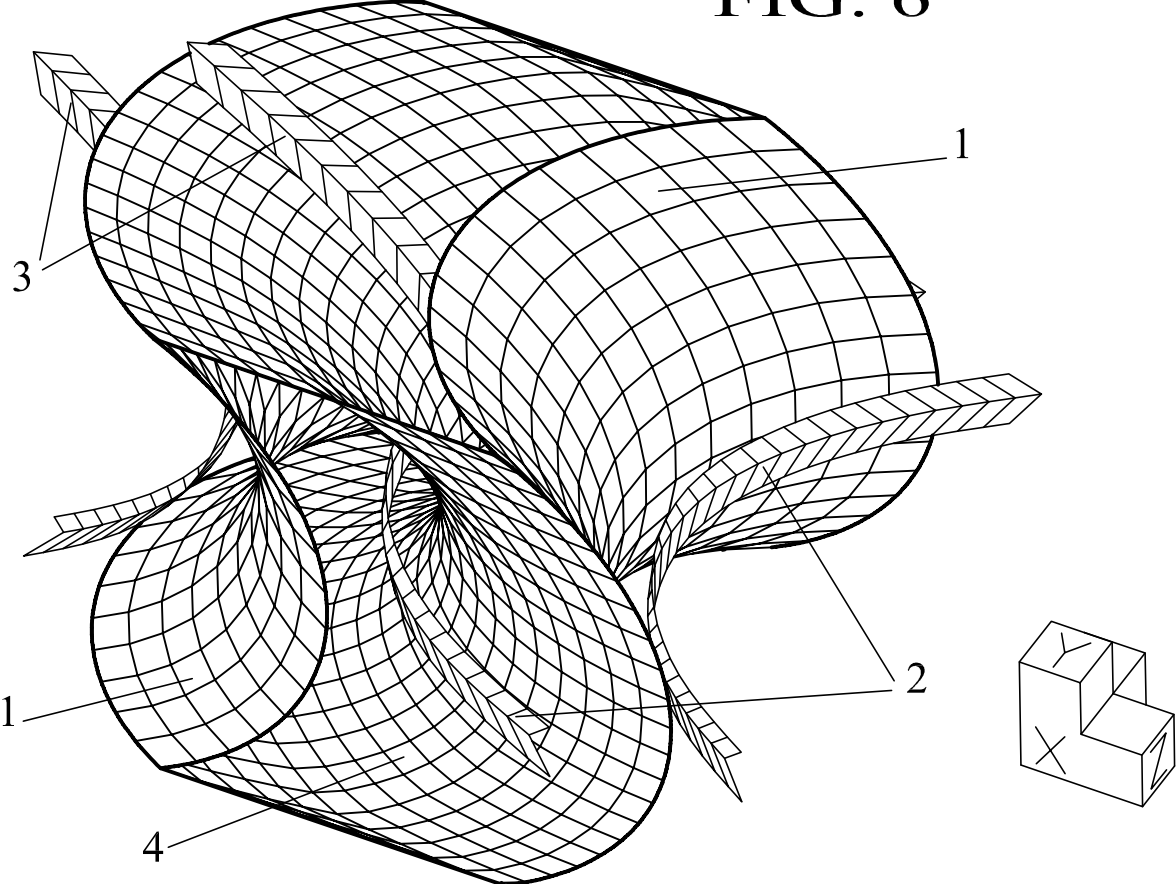


FIG. 6



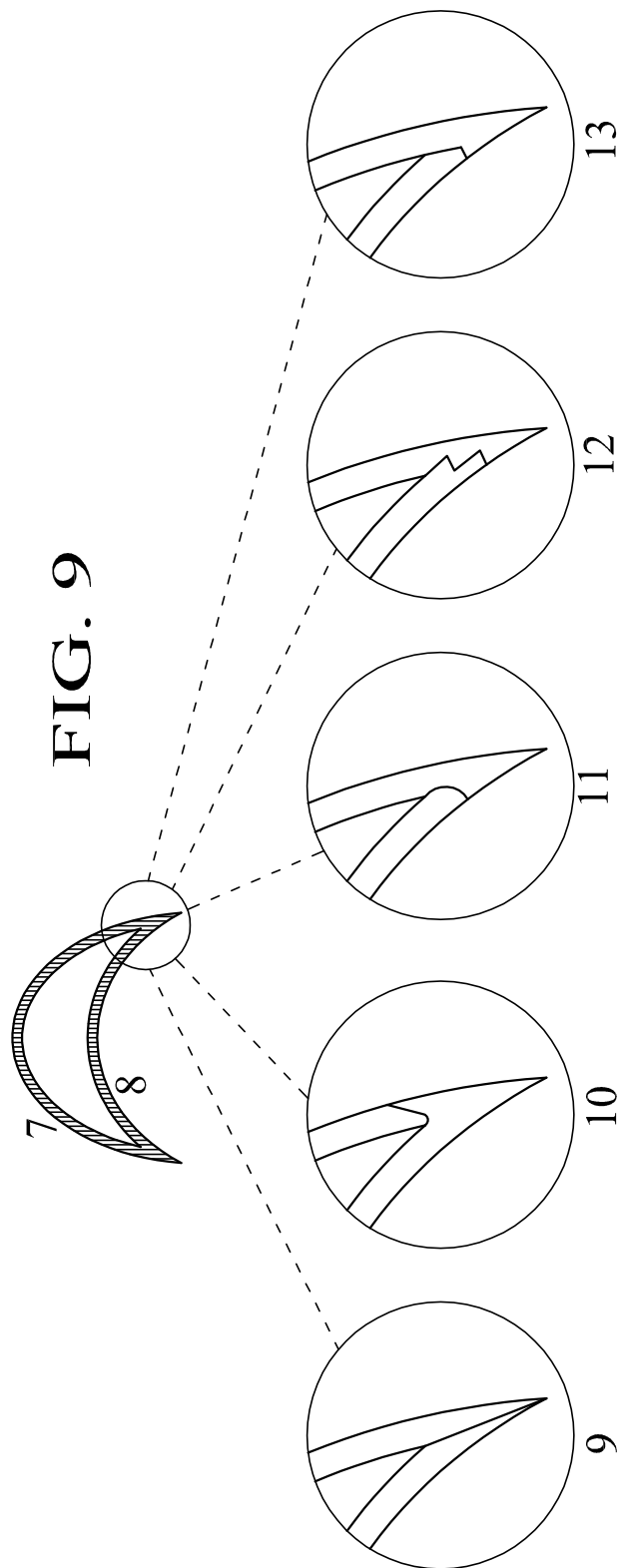
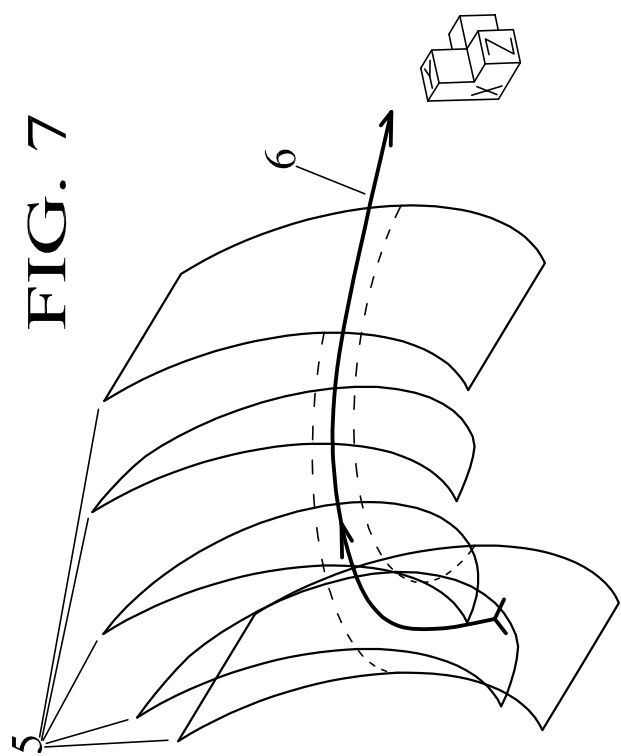
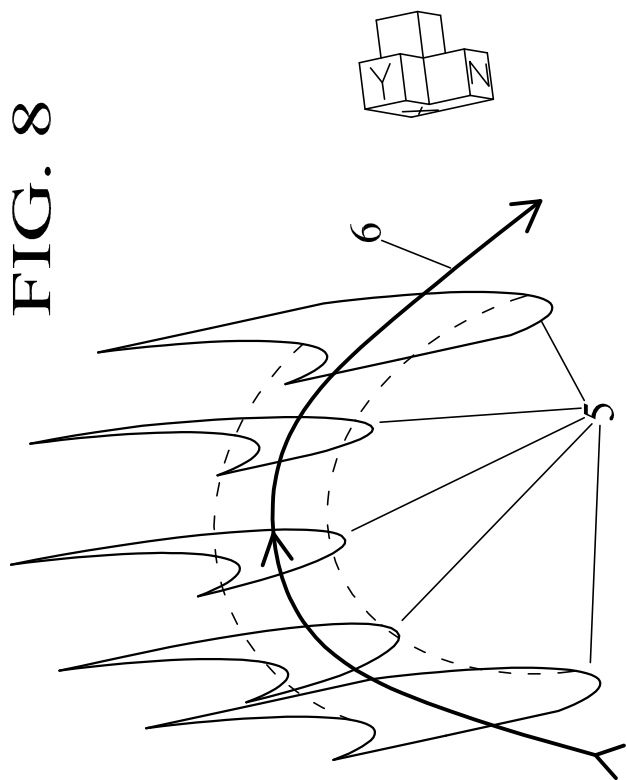


FIG. 11

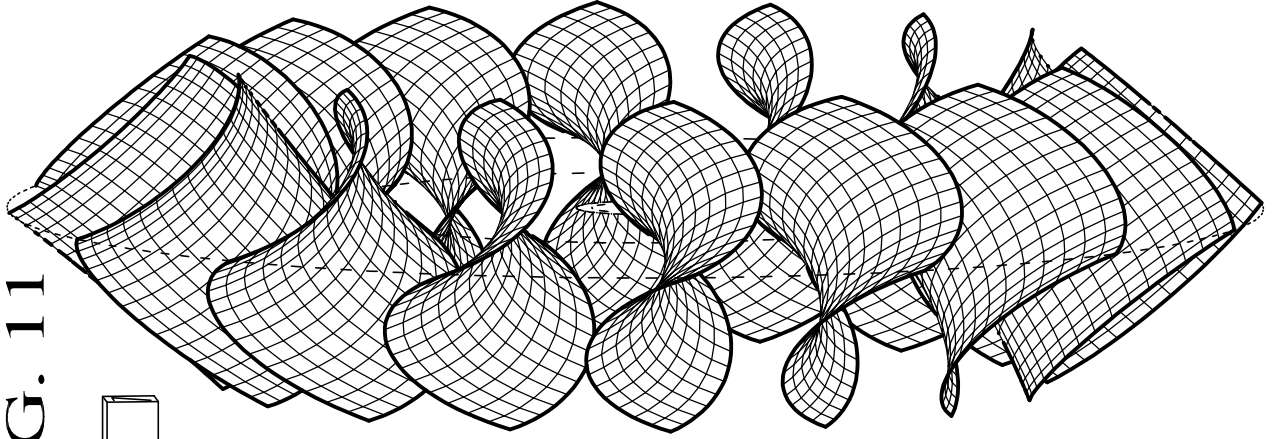
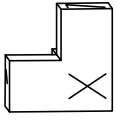
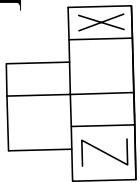


FIG. 10



1

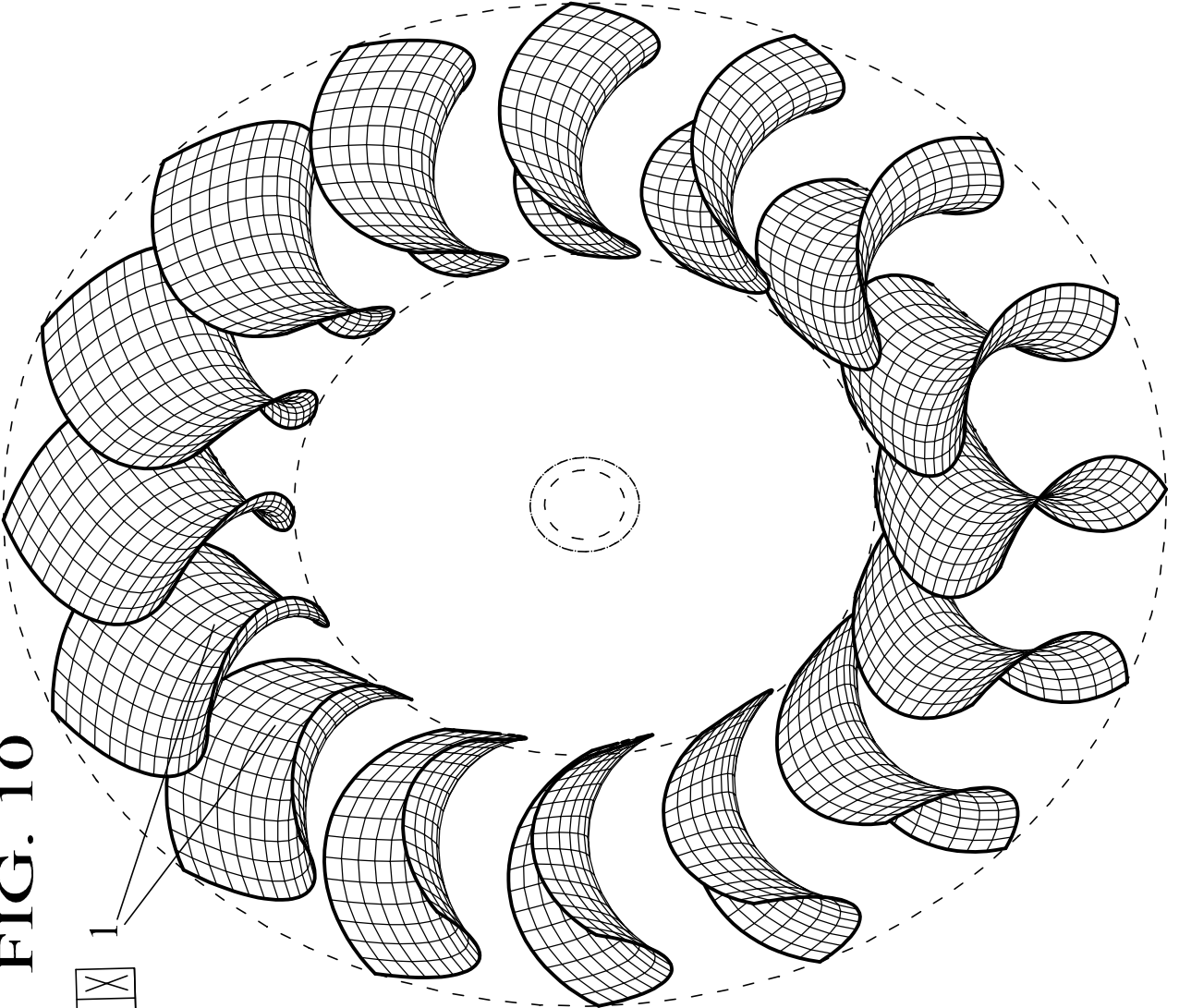


FIG. 13

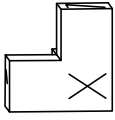
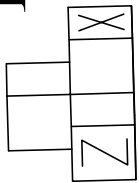


FIG. 12



1

4

FIG. 14

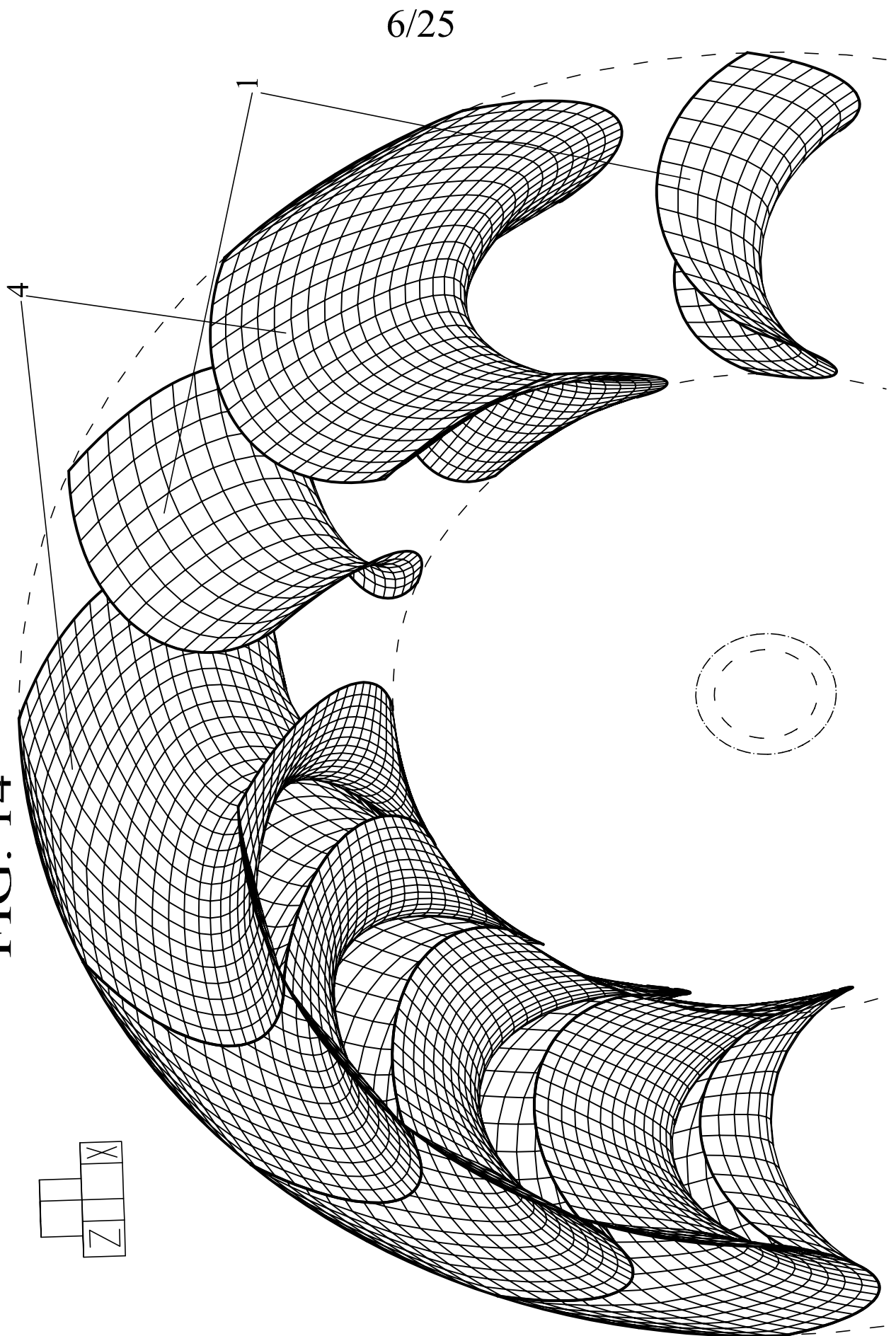


FIG. 15

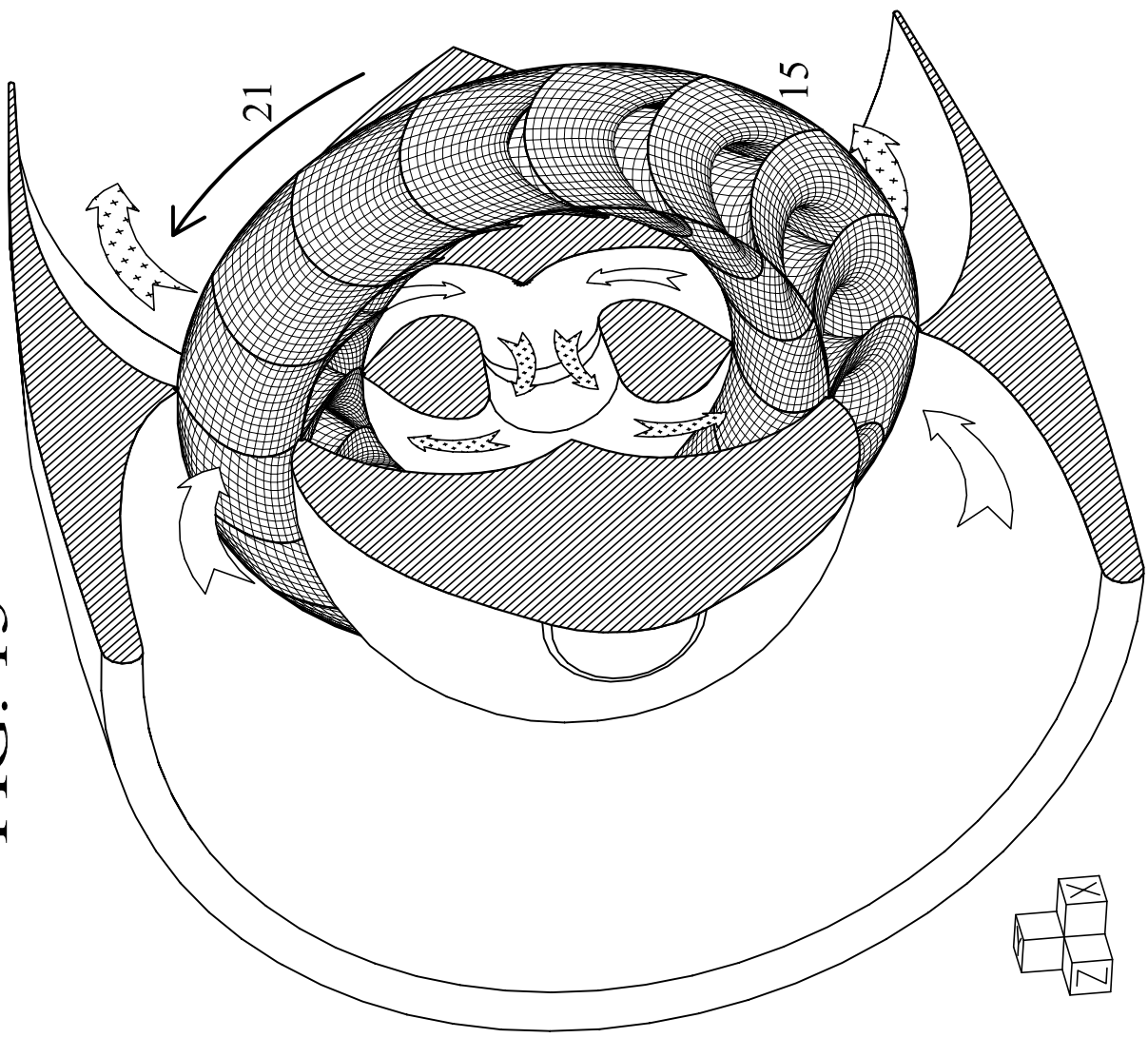
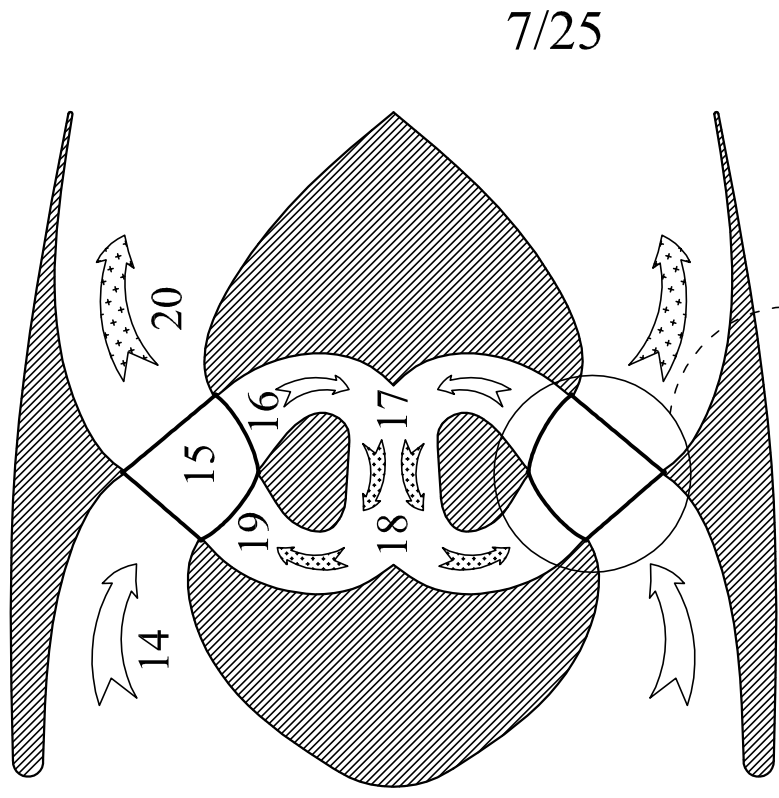


FIG. 16



7/25

FIG. 17

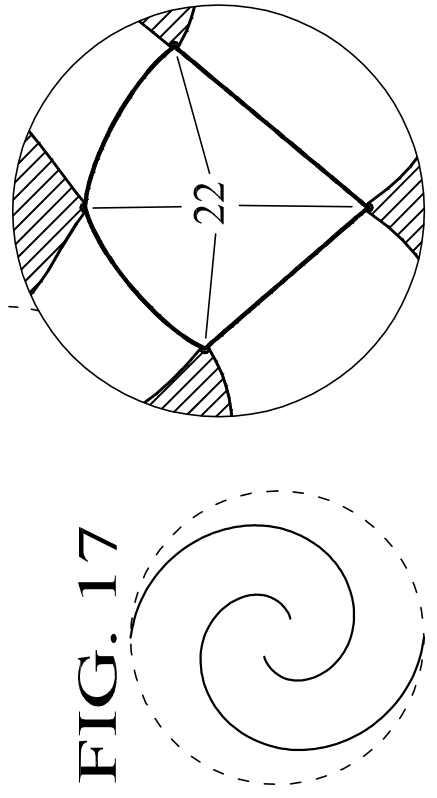


FIG. 18

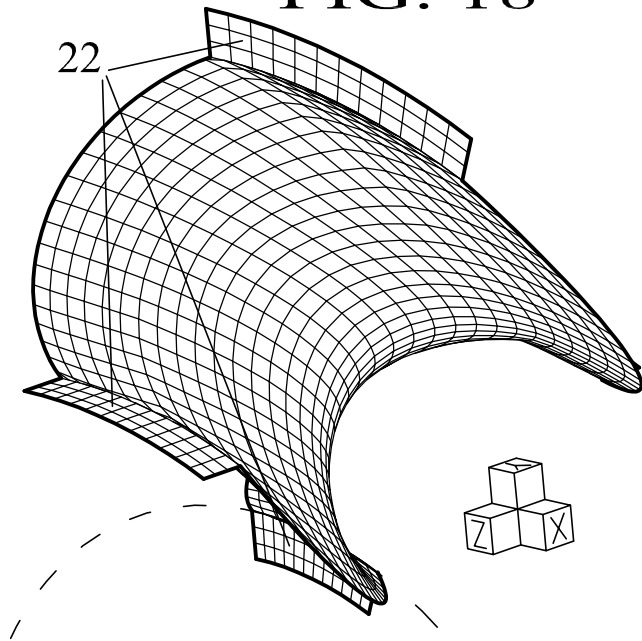


FIG. 19

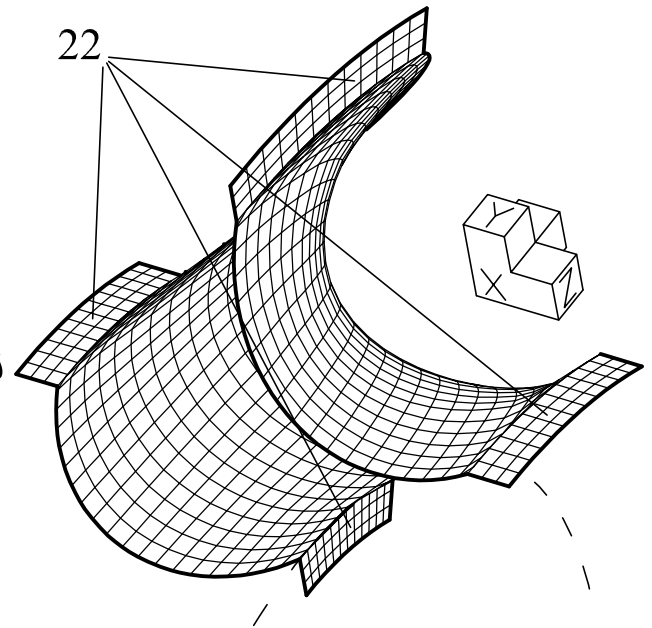
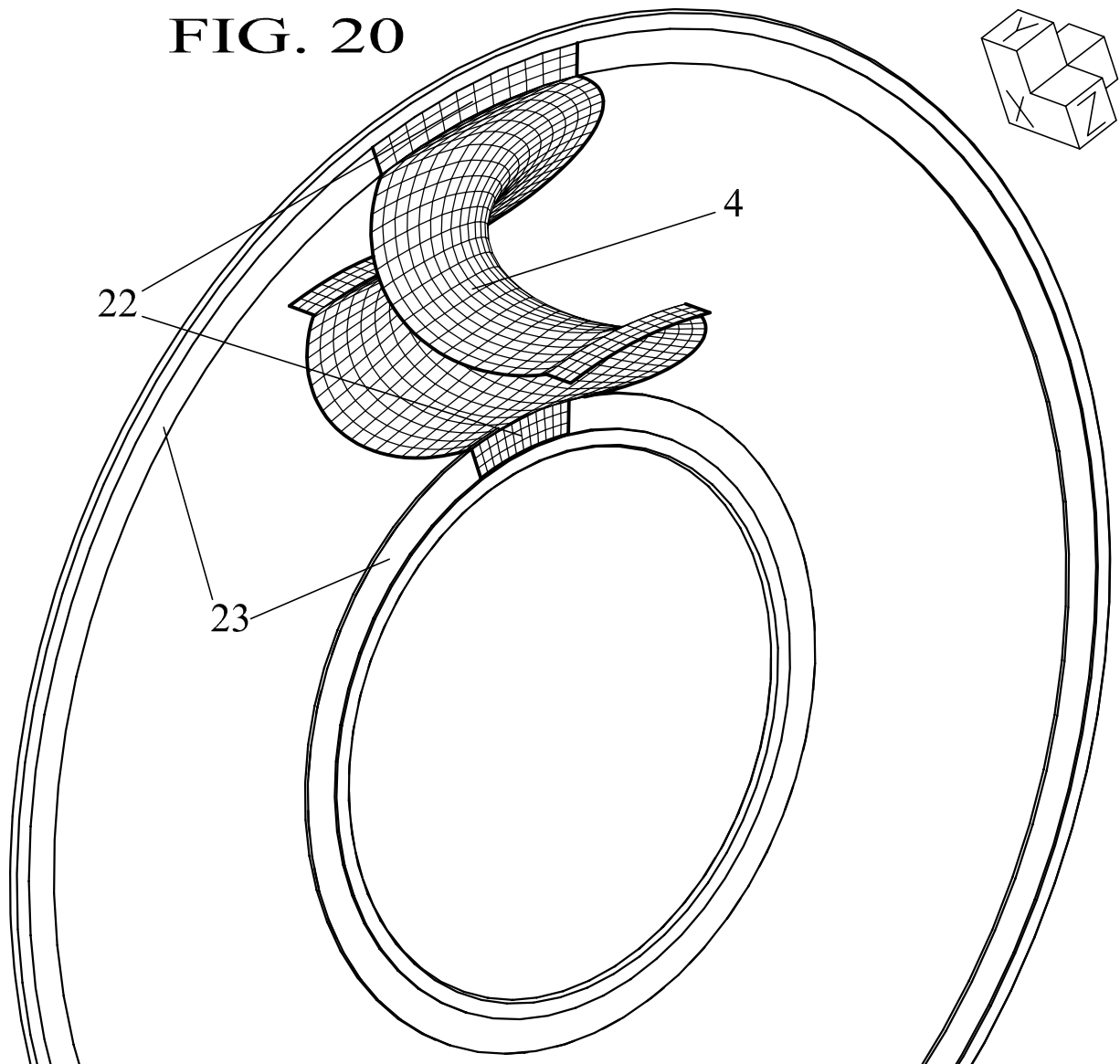


FIG. 20



9/25

FIG. 21

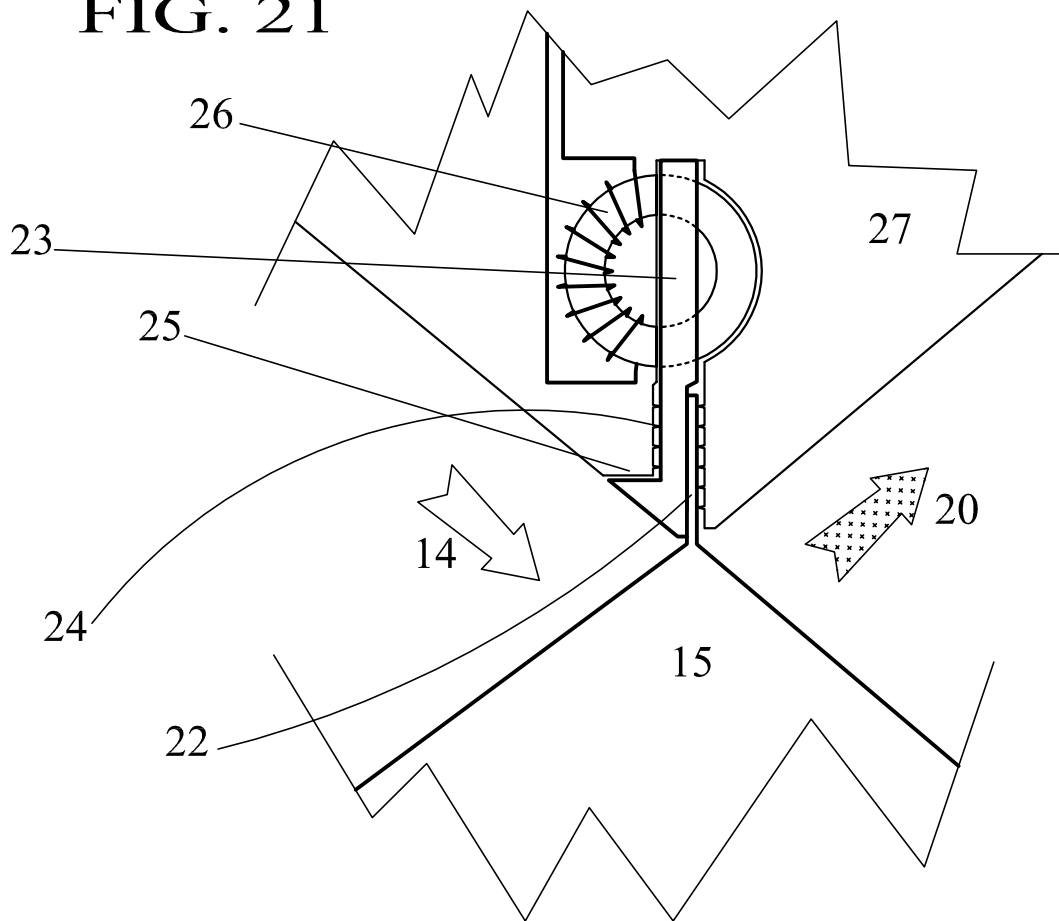


FIG. 22

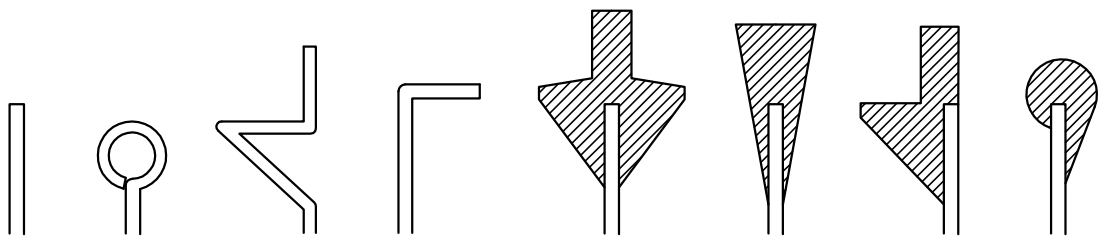


FIG. 23

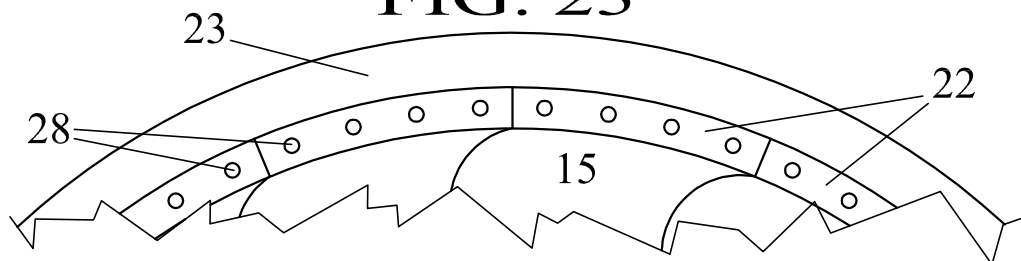


FIG. 24

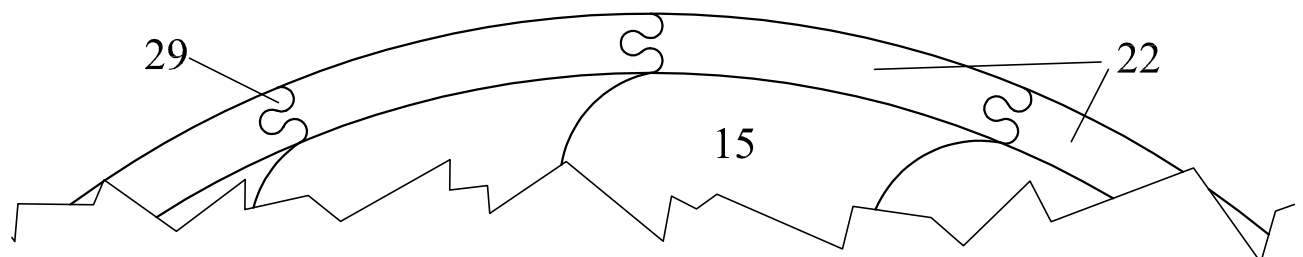


FIG. 25

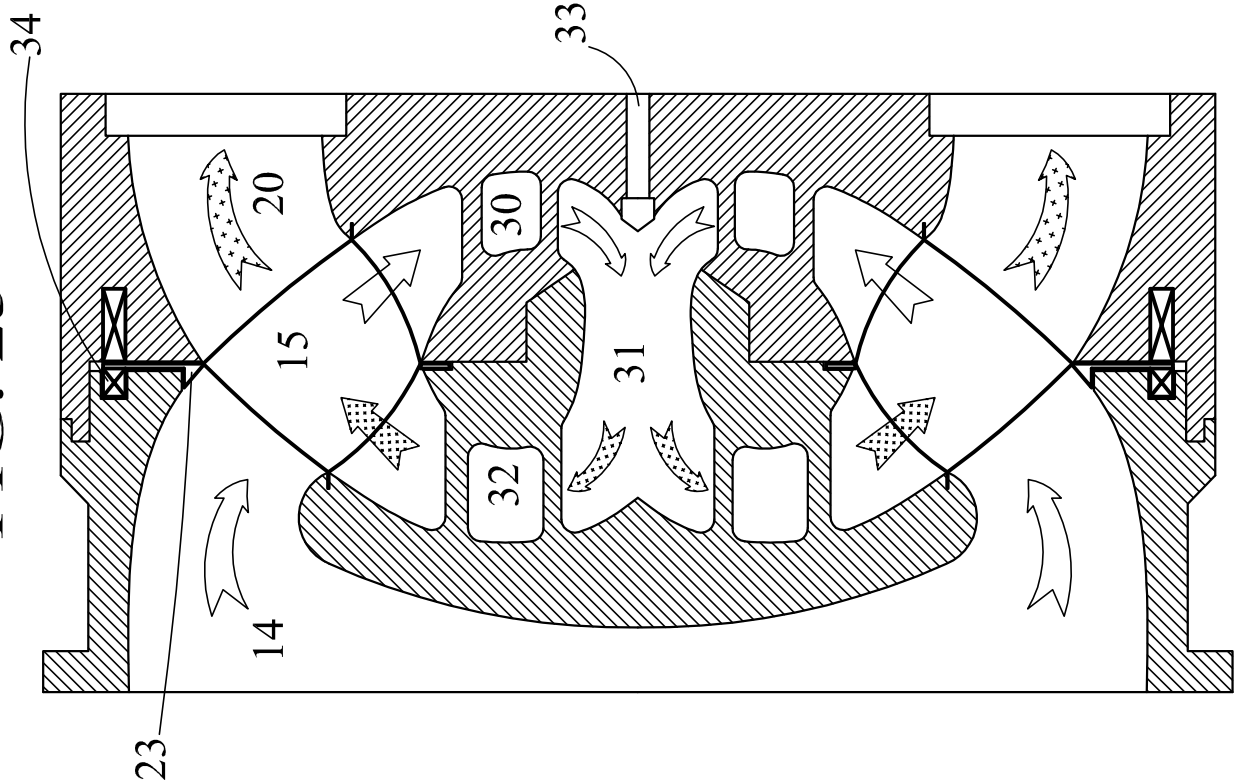


FIG. 26

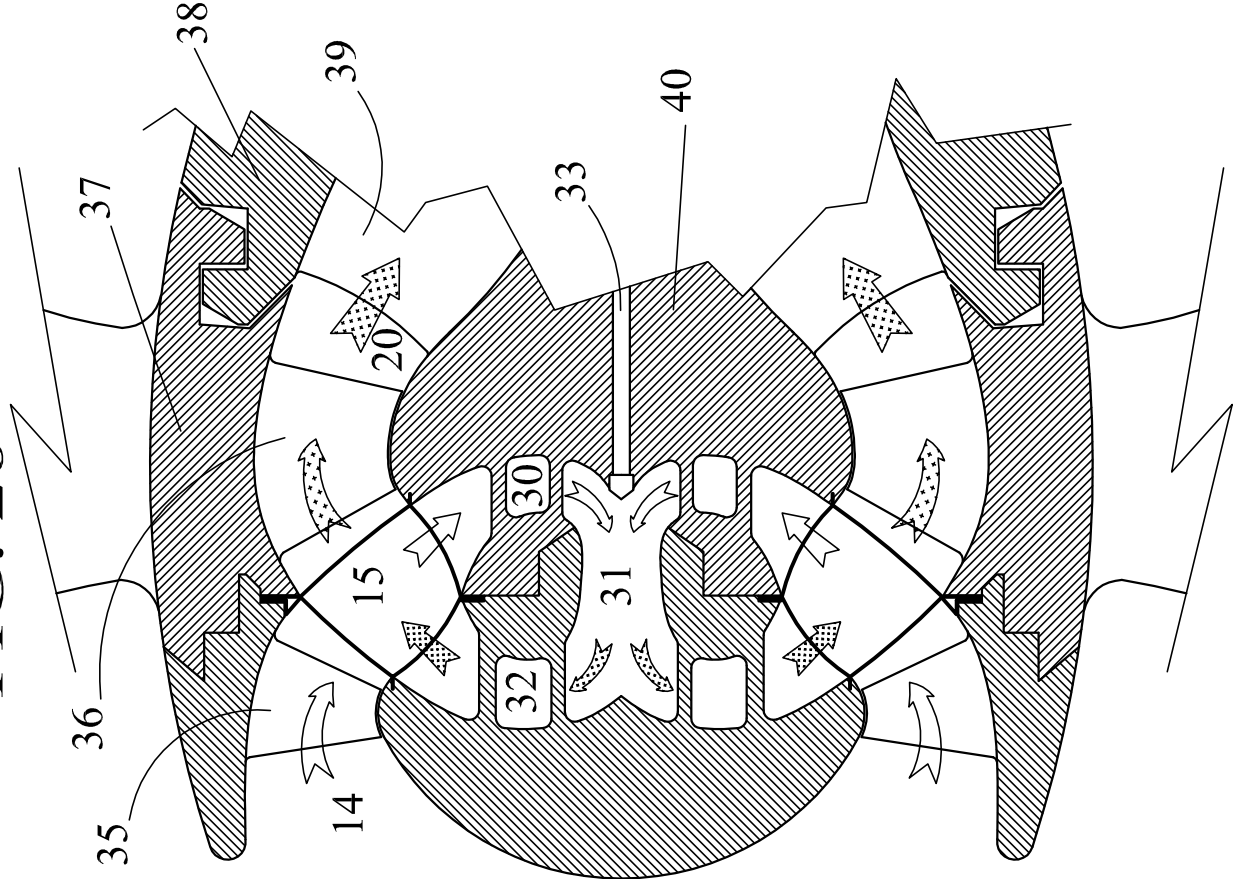


FIG. 27

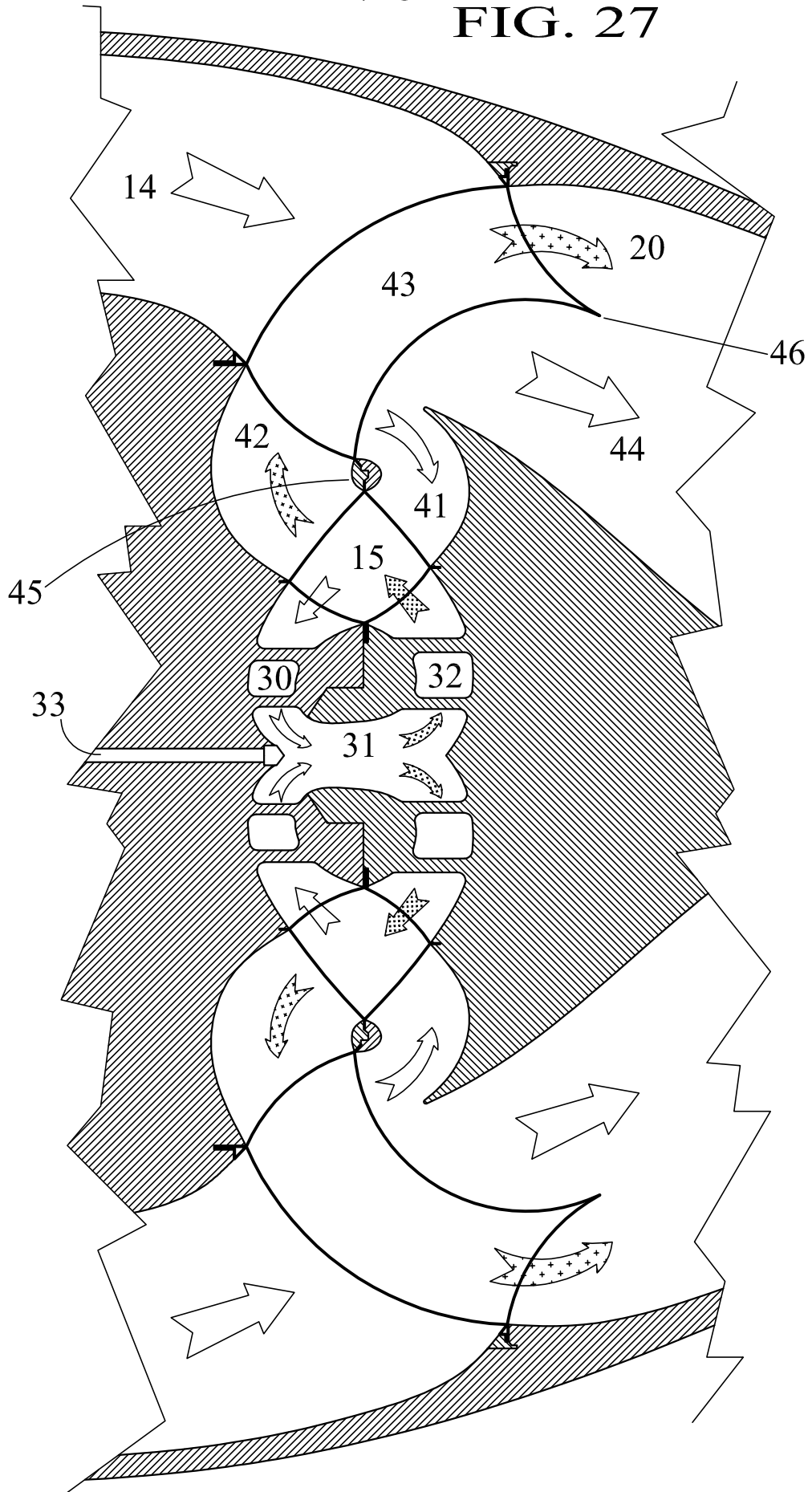


FIG. 28

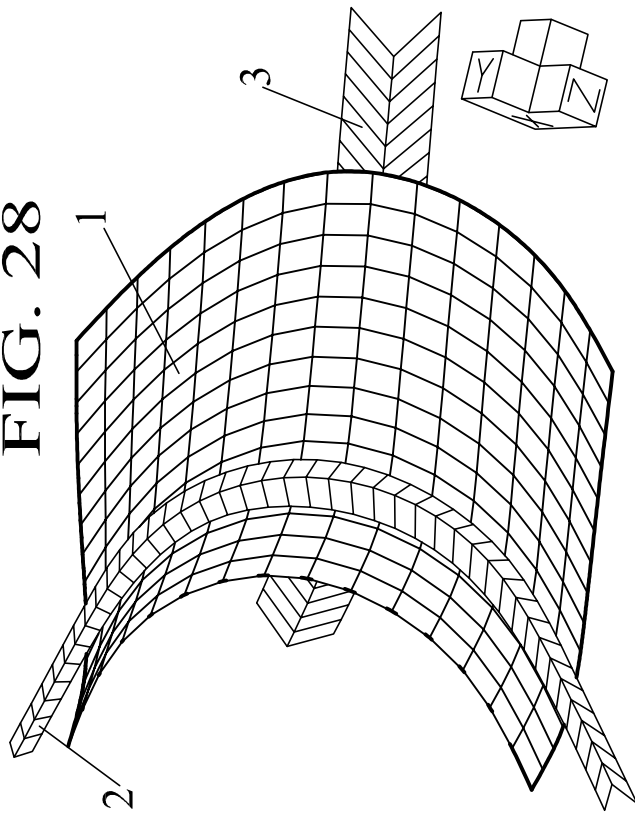


FIG. 29

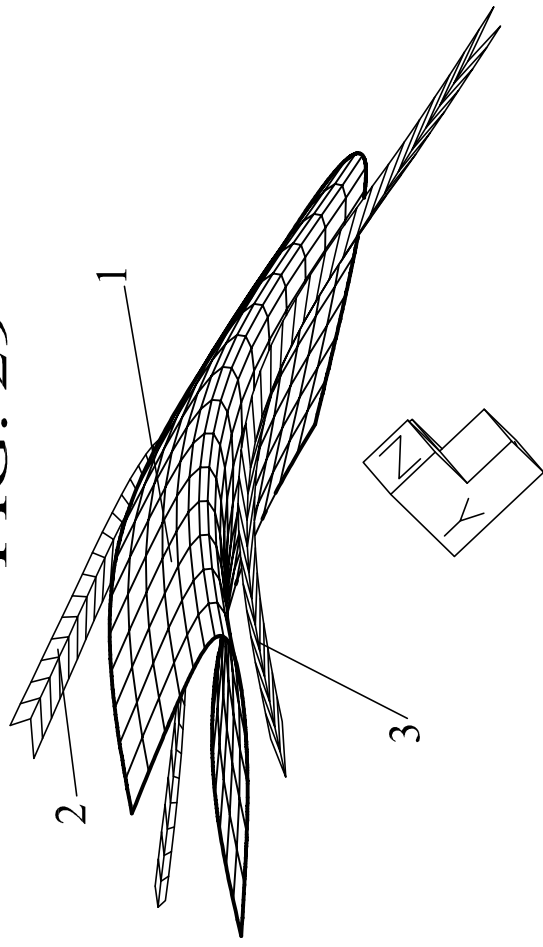


FIG. 30

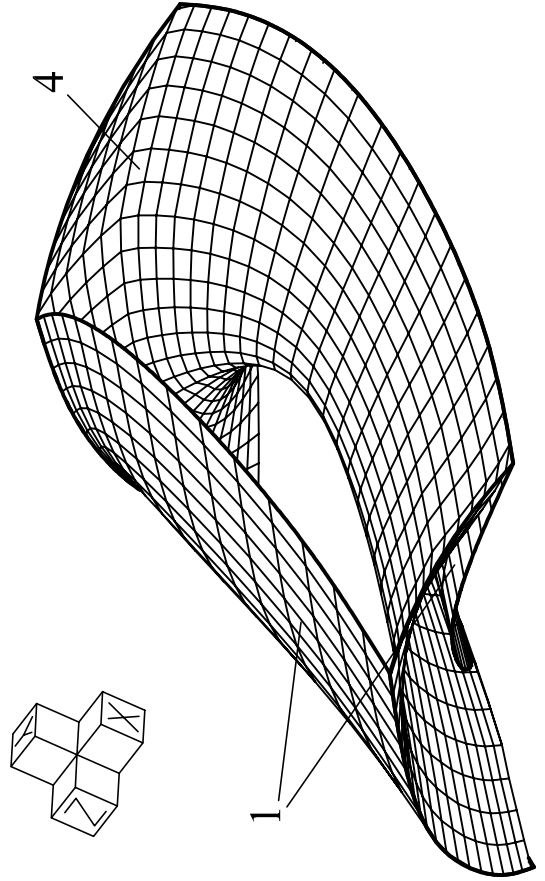


FIG. 31

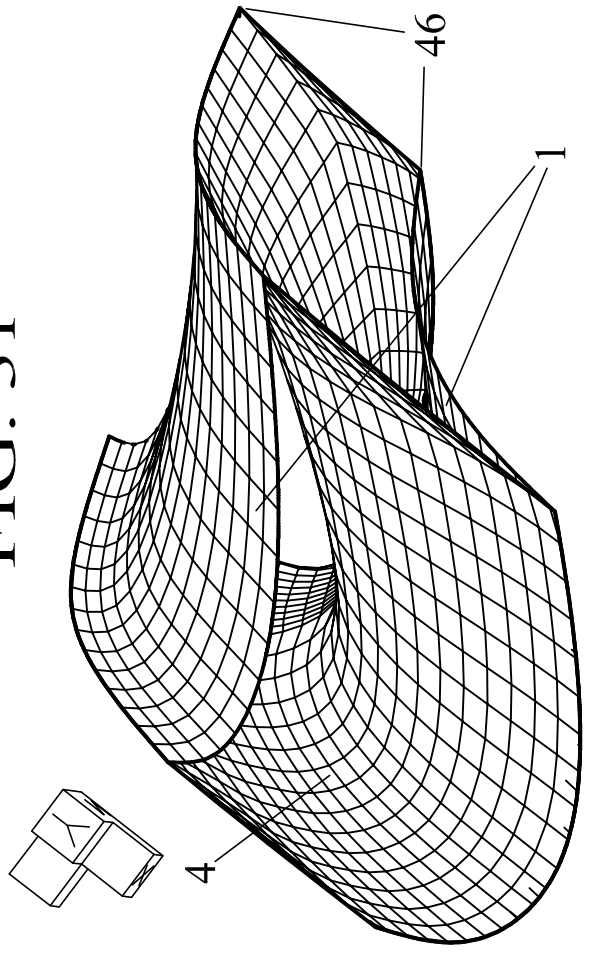


FIG. 32

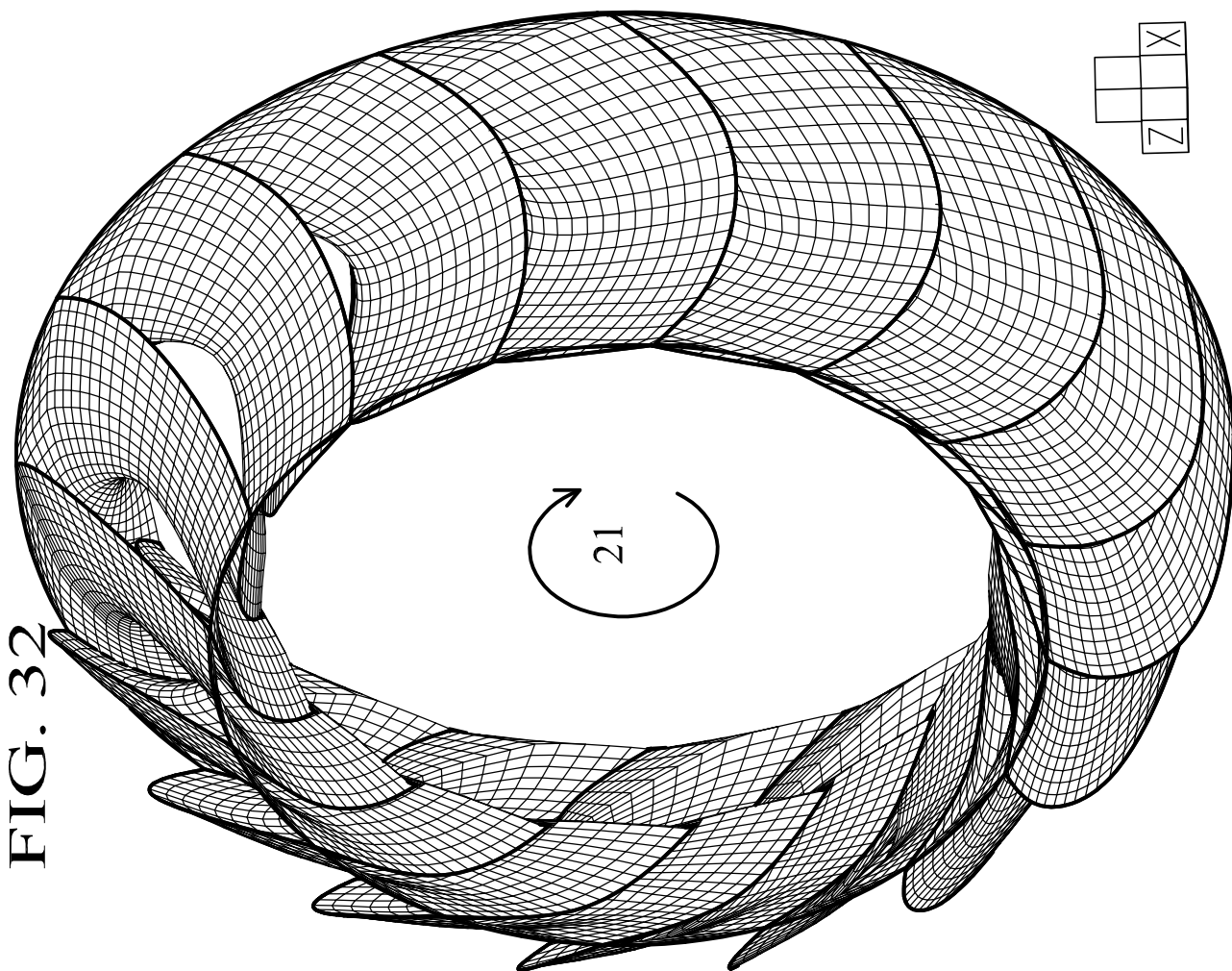


FIG. 33

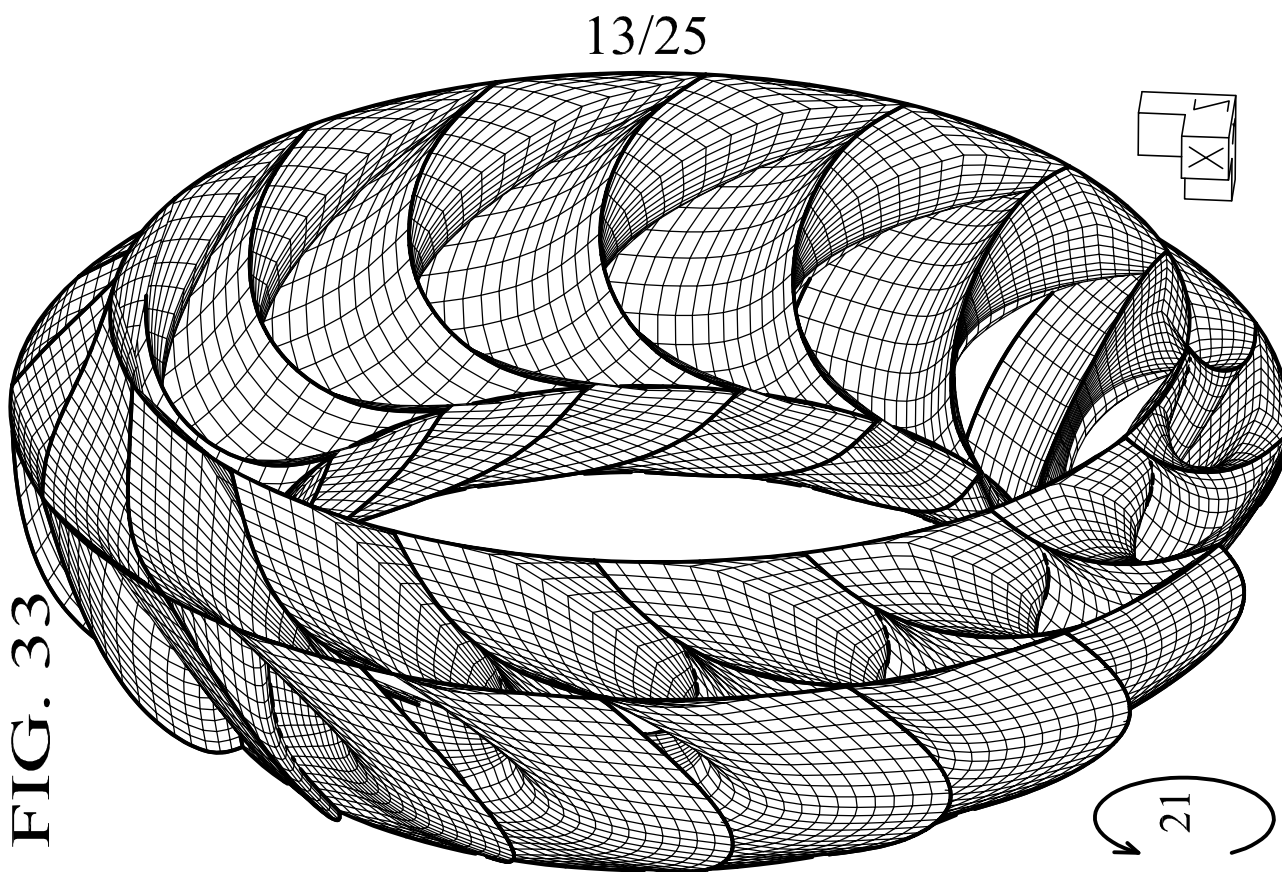


FIG. 34

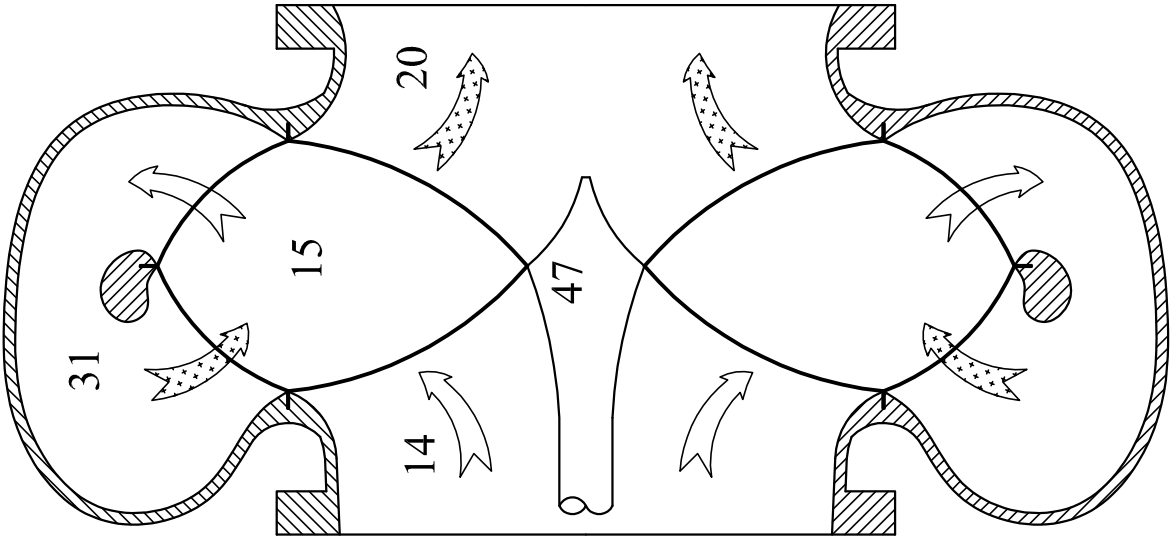


FIG. 35

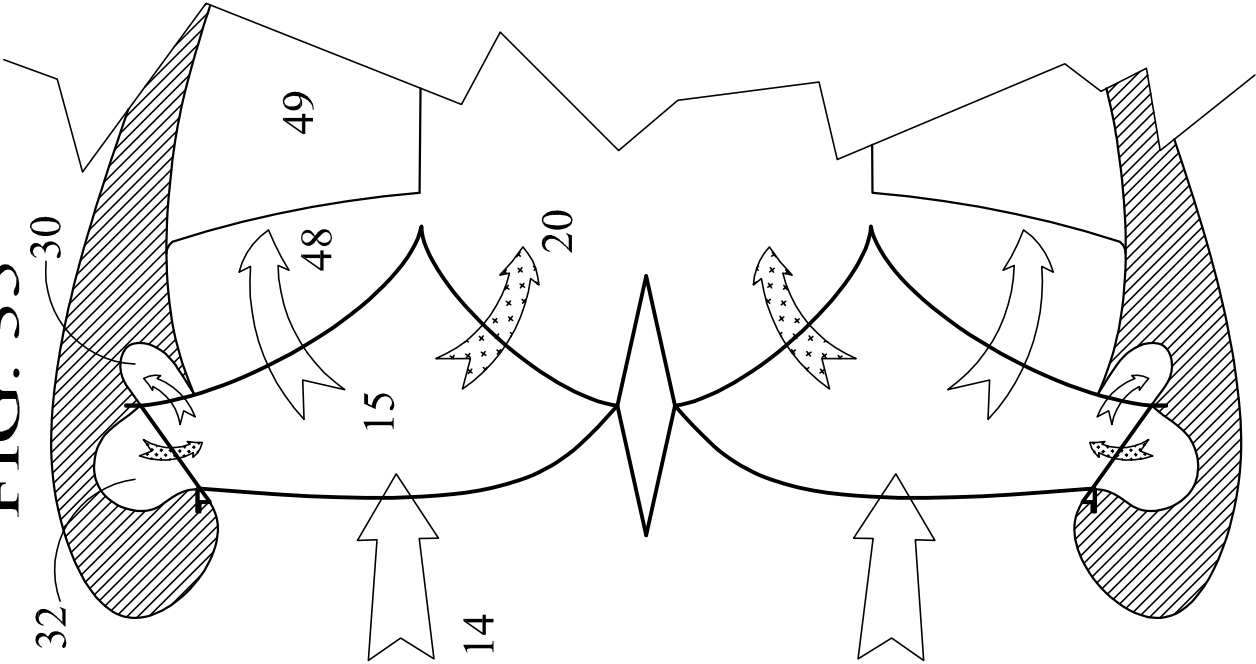


FIG. 36

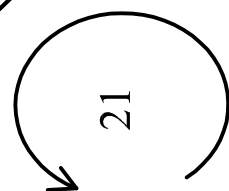
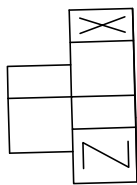
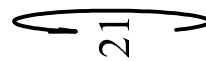
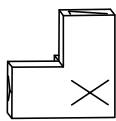


FIG. 37



15/25

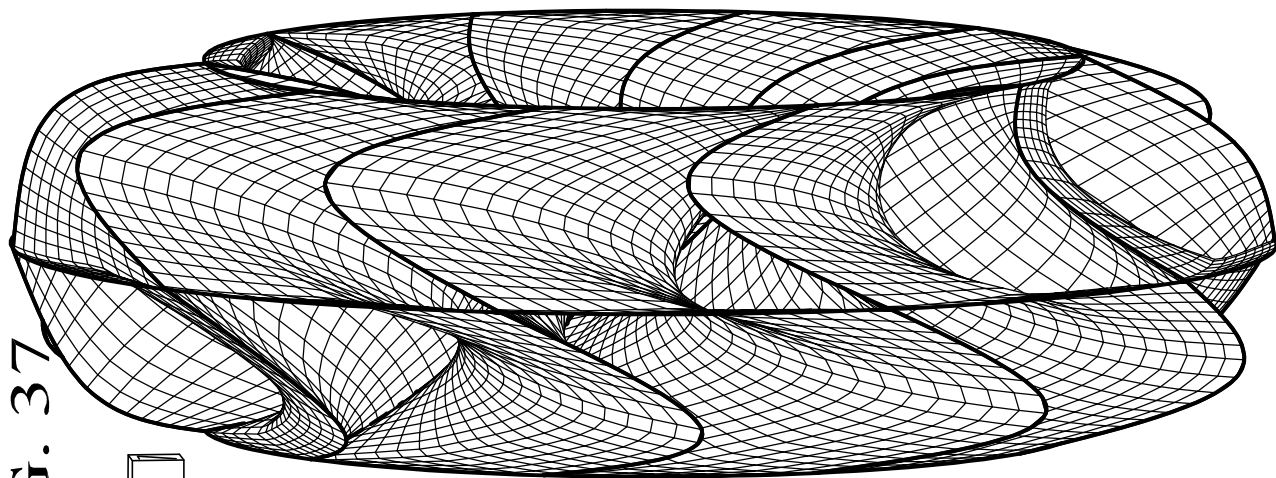


FIG. 38

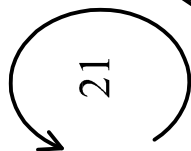
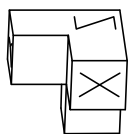


FIG. 39



16/25

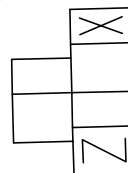
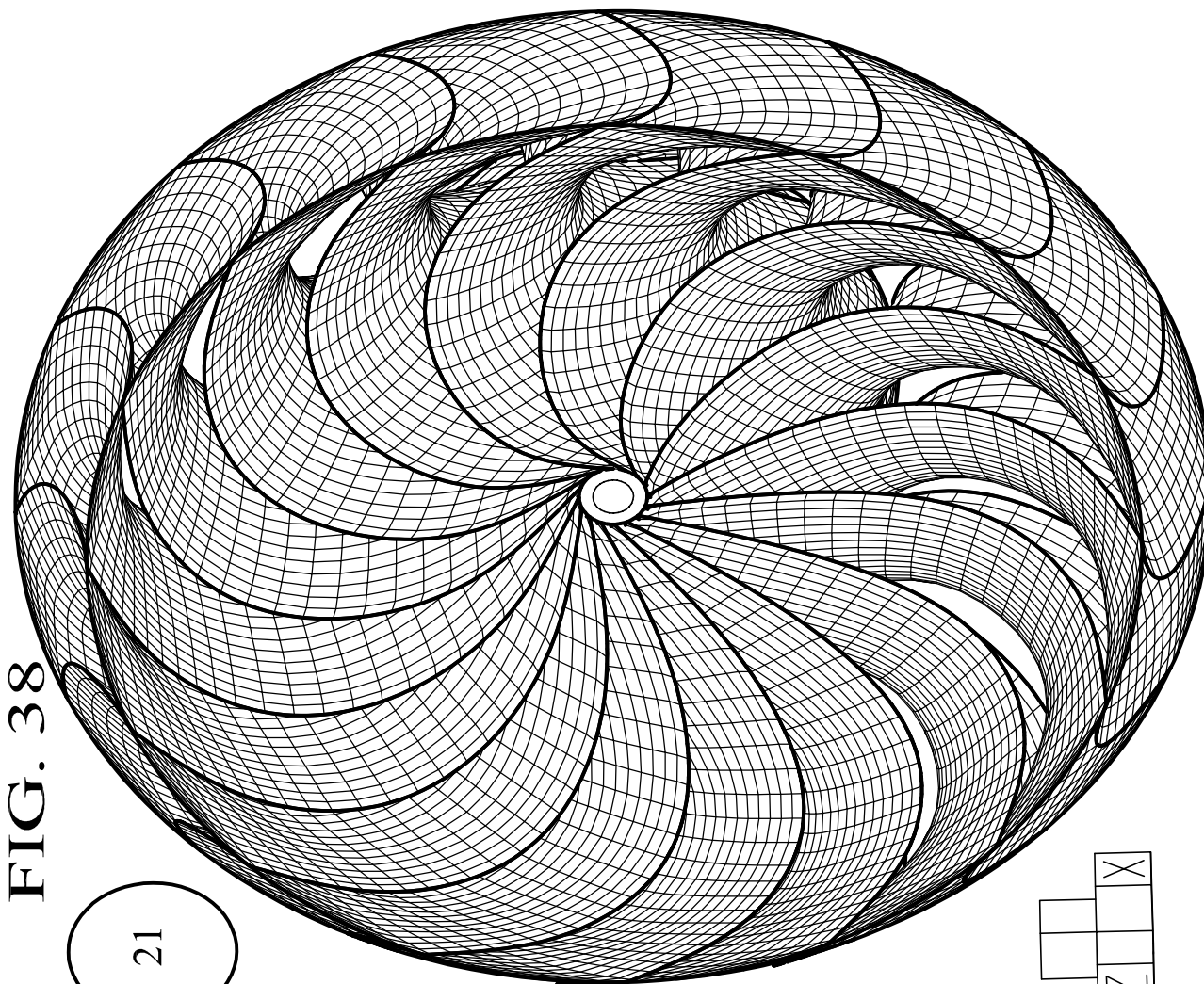
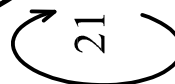
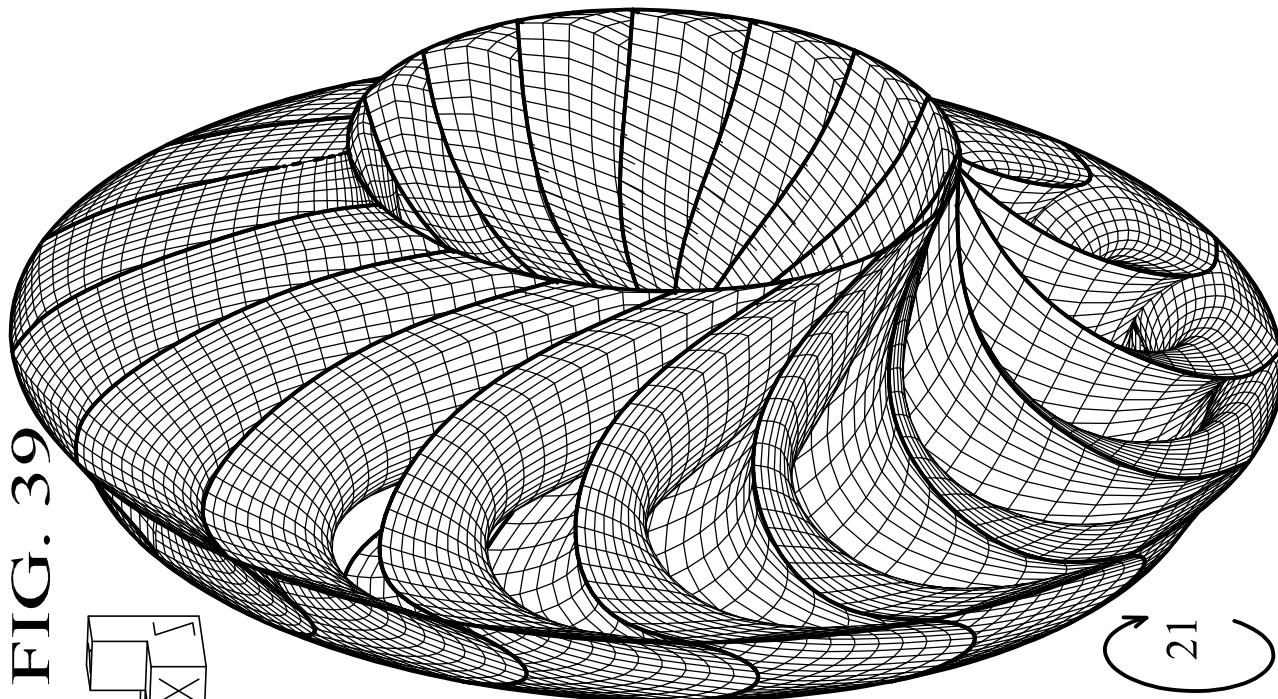


FIG. 40

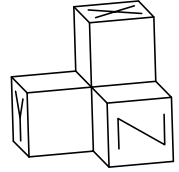
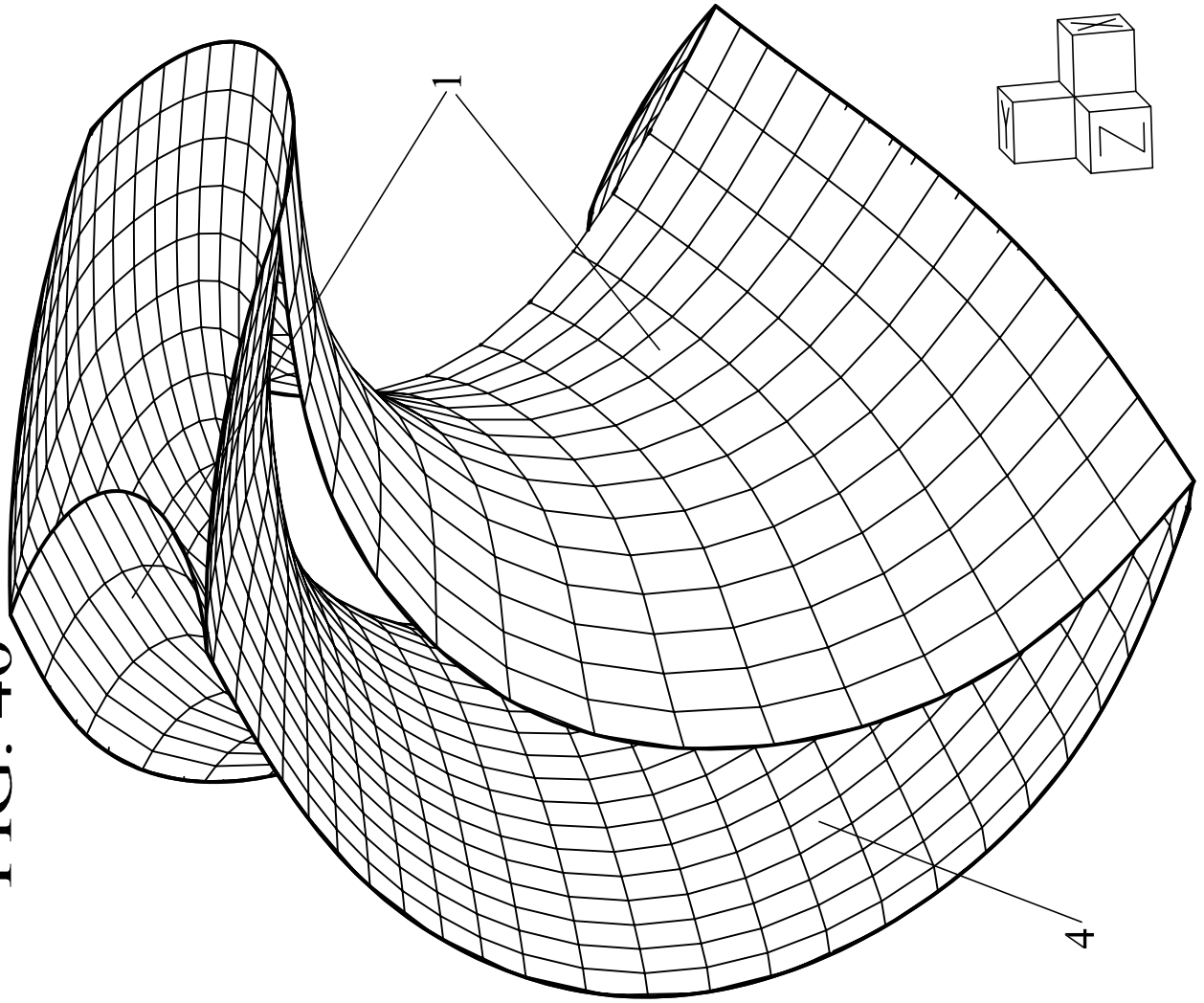
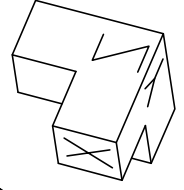
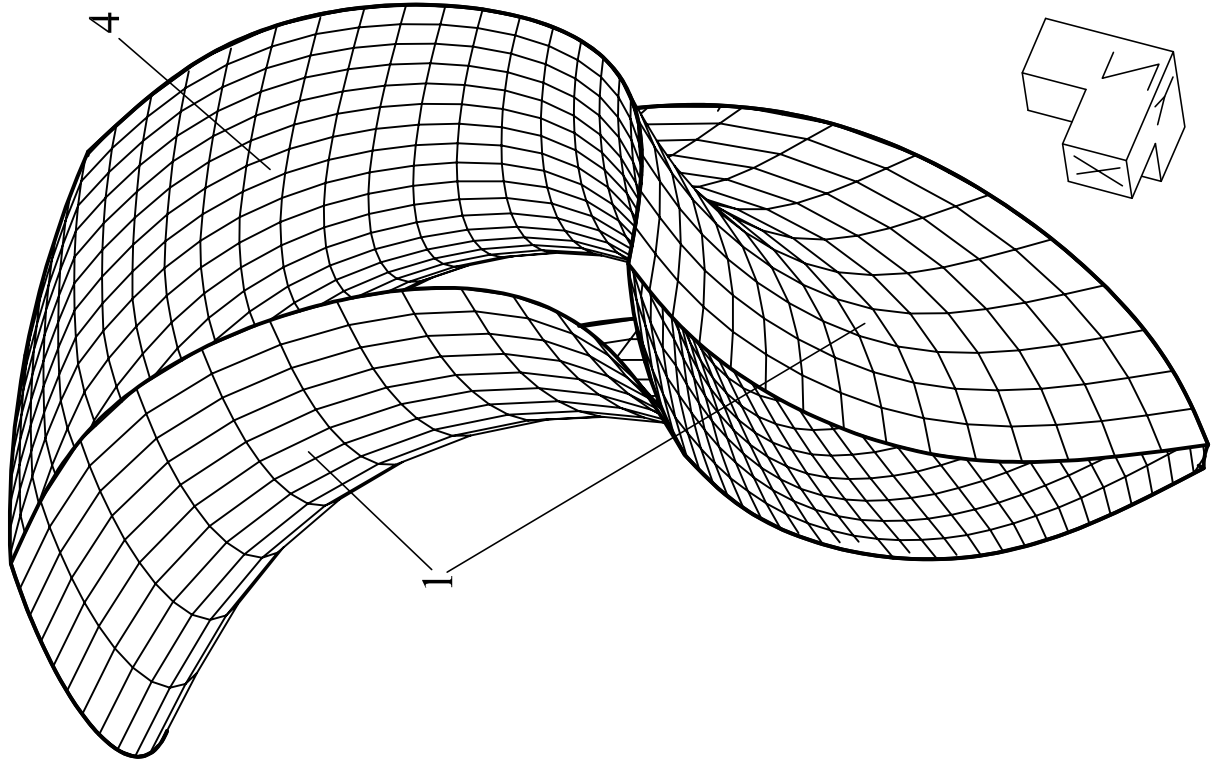


FIG. 41



17/25

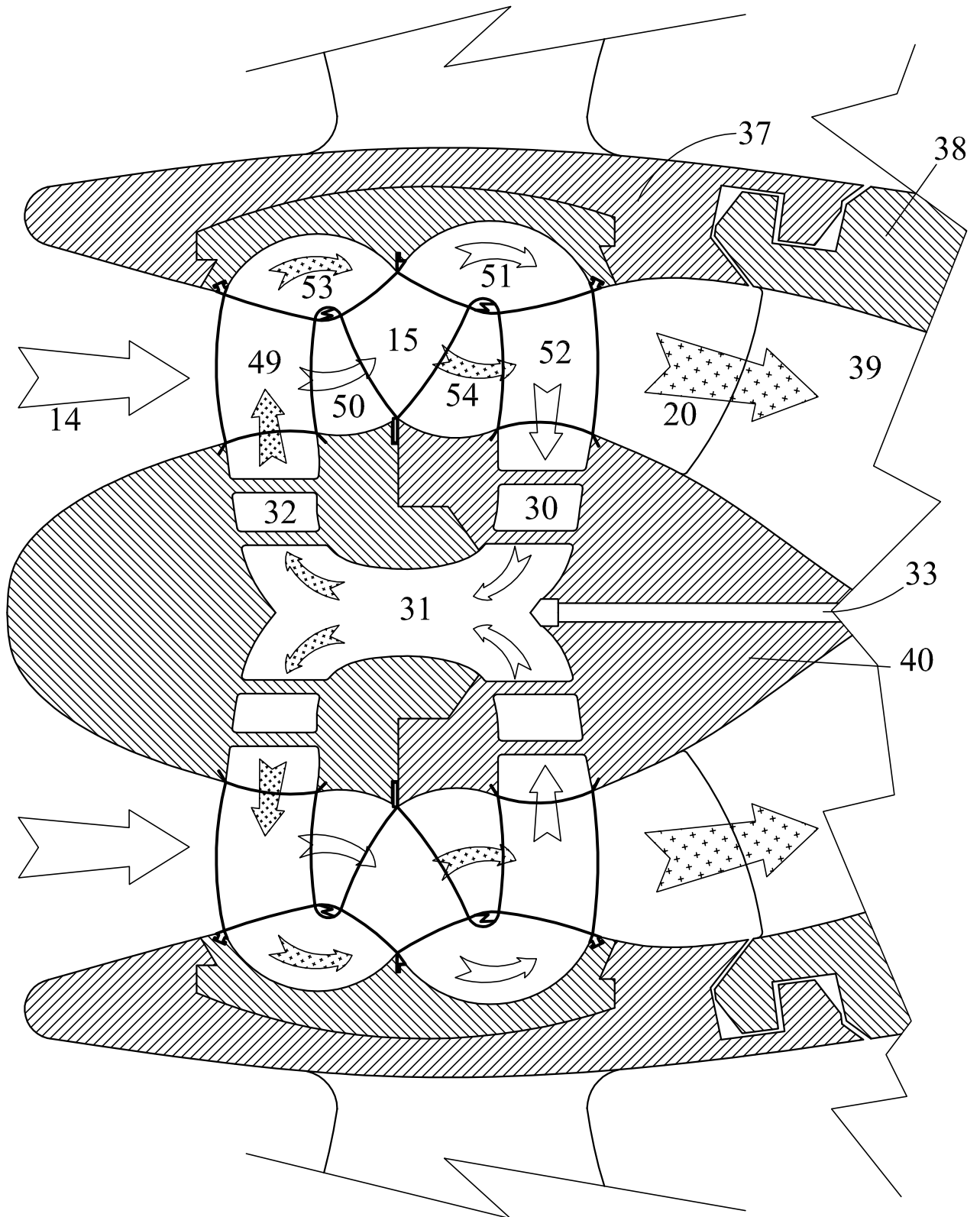


FIG. 43

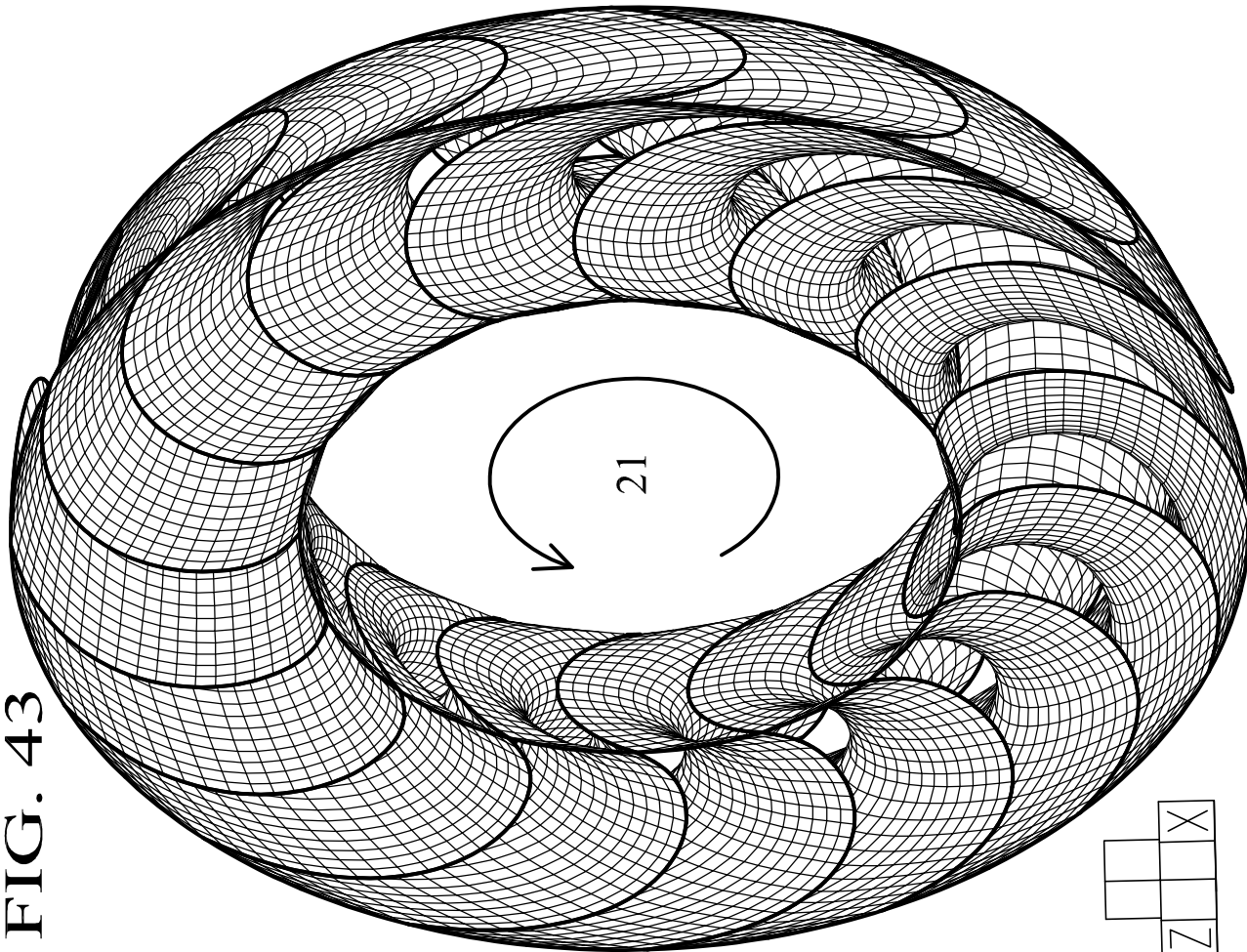


FIG. 44

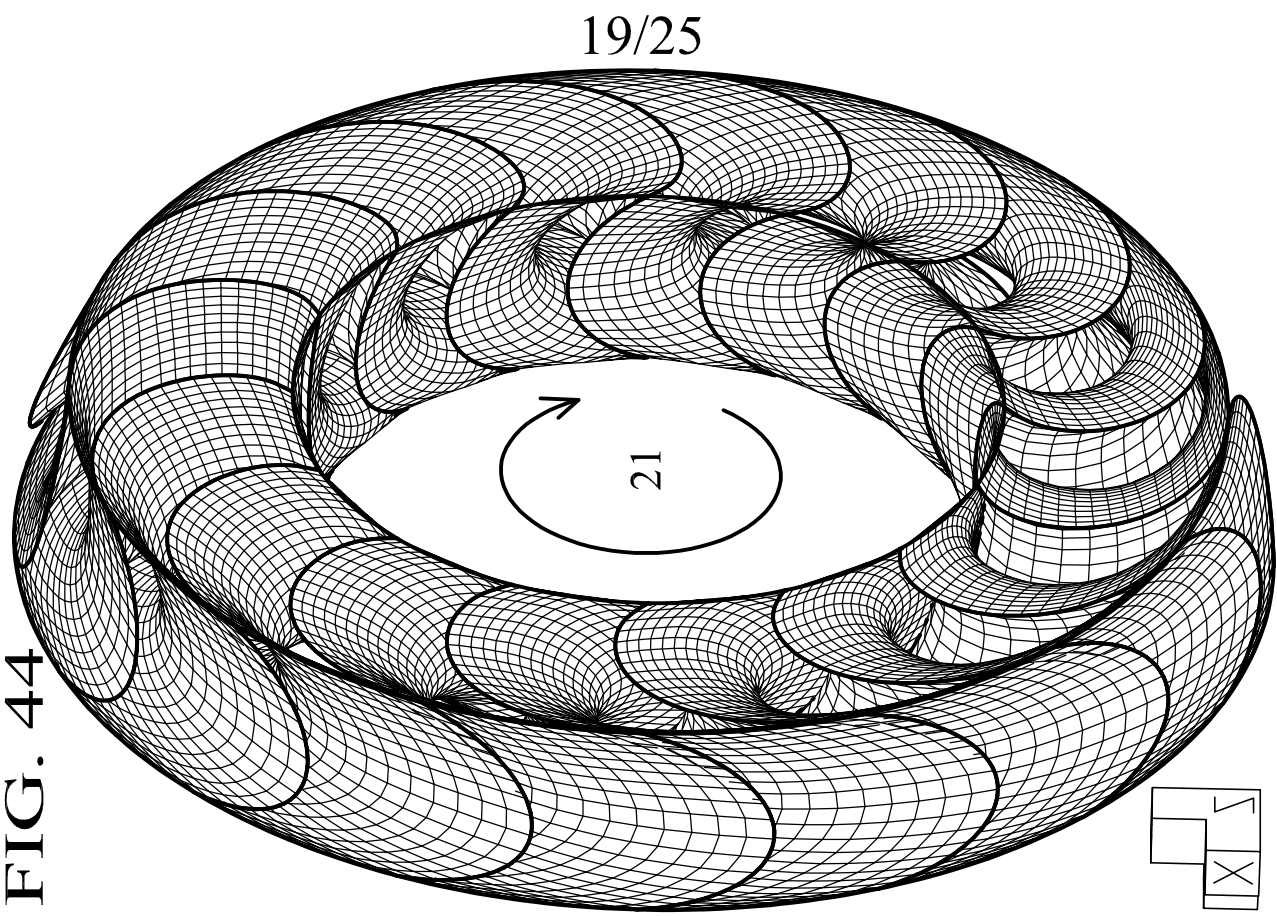


FIG. 45

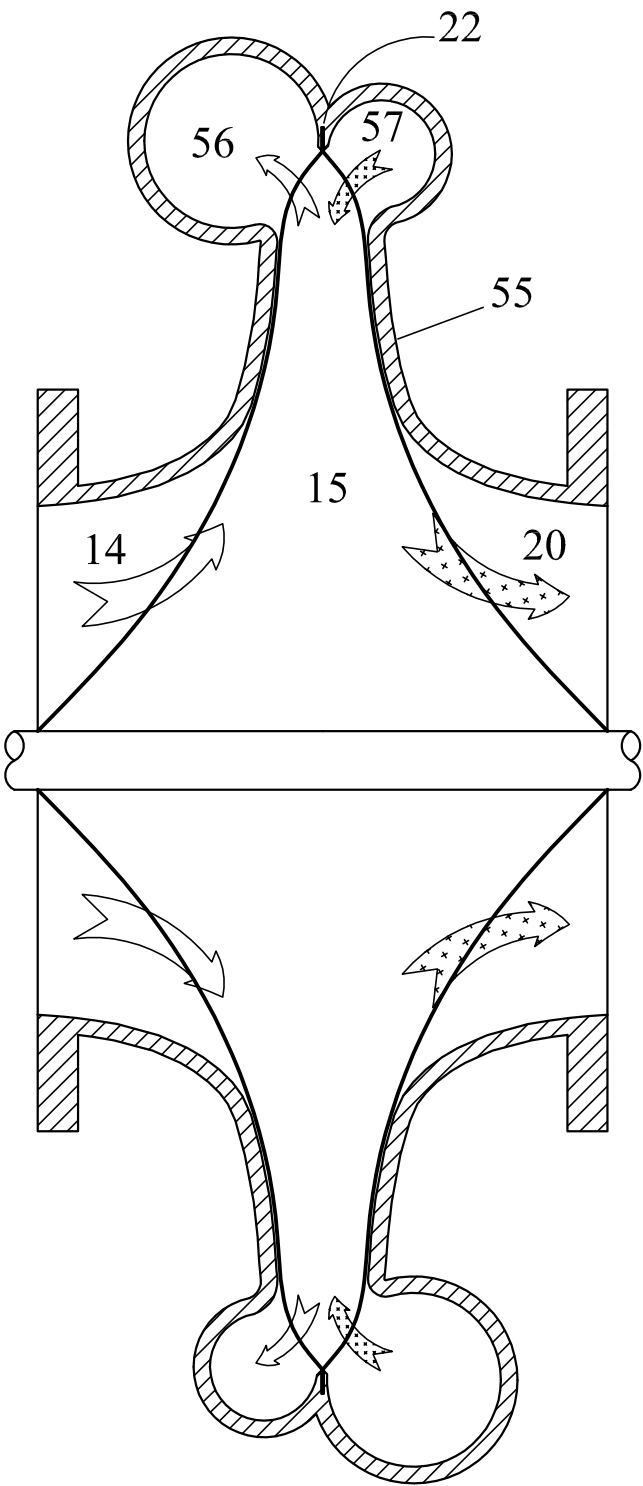


FIG. 46

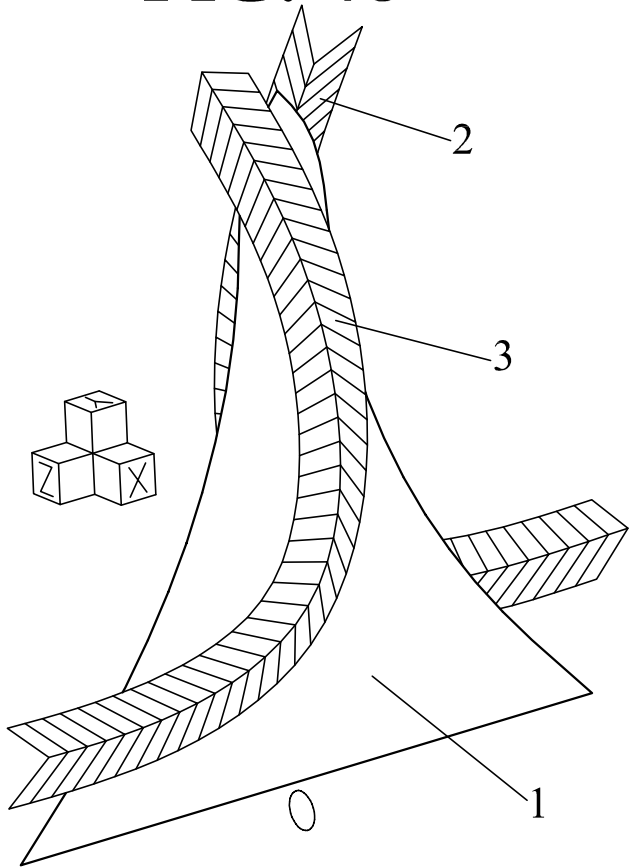


FIG. 47

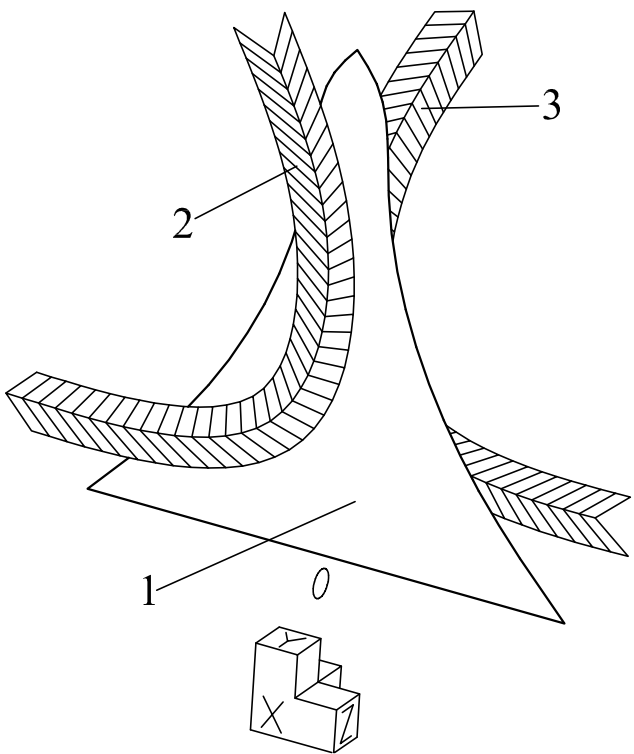


FIG. 49

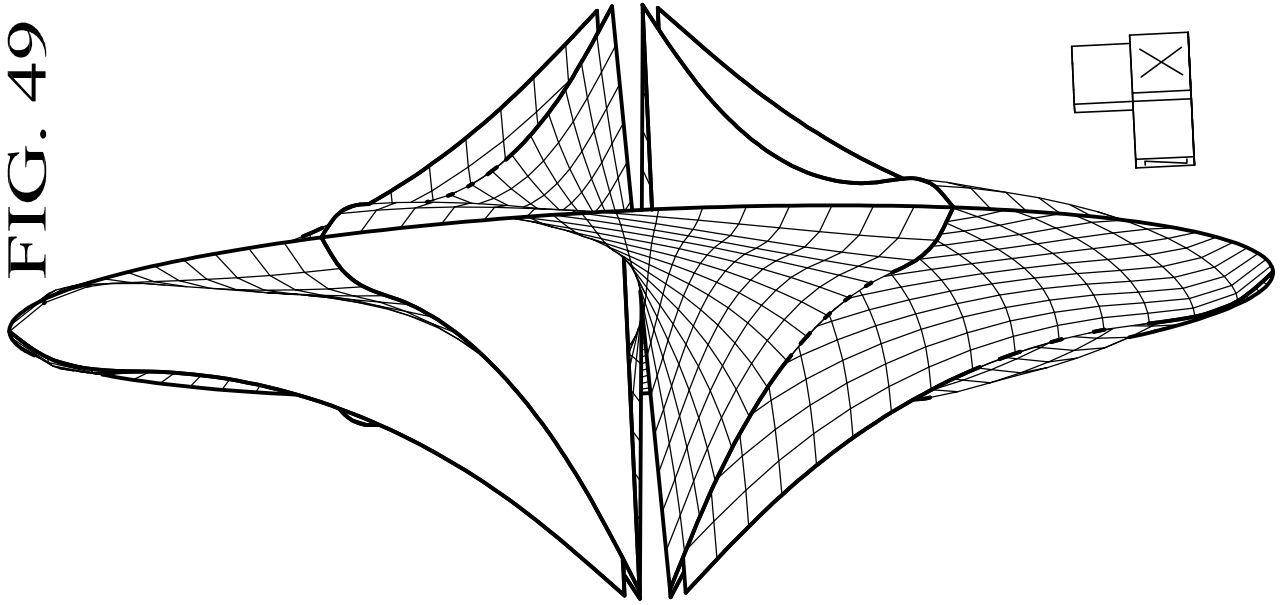


FIG. 48

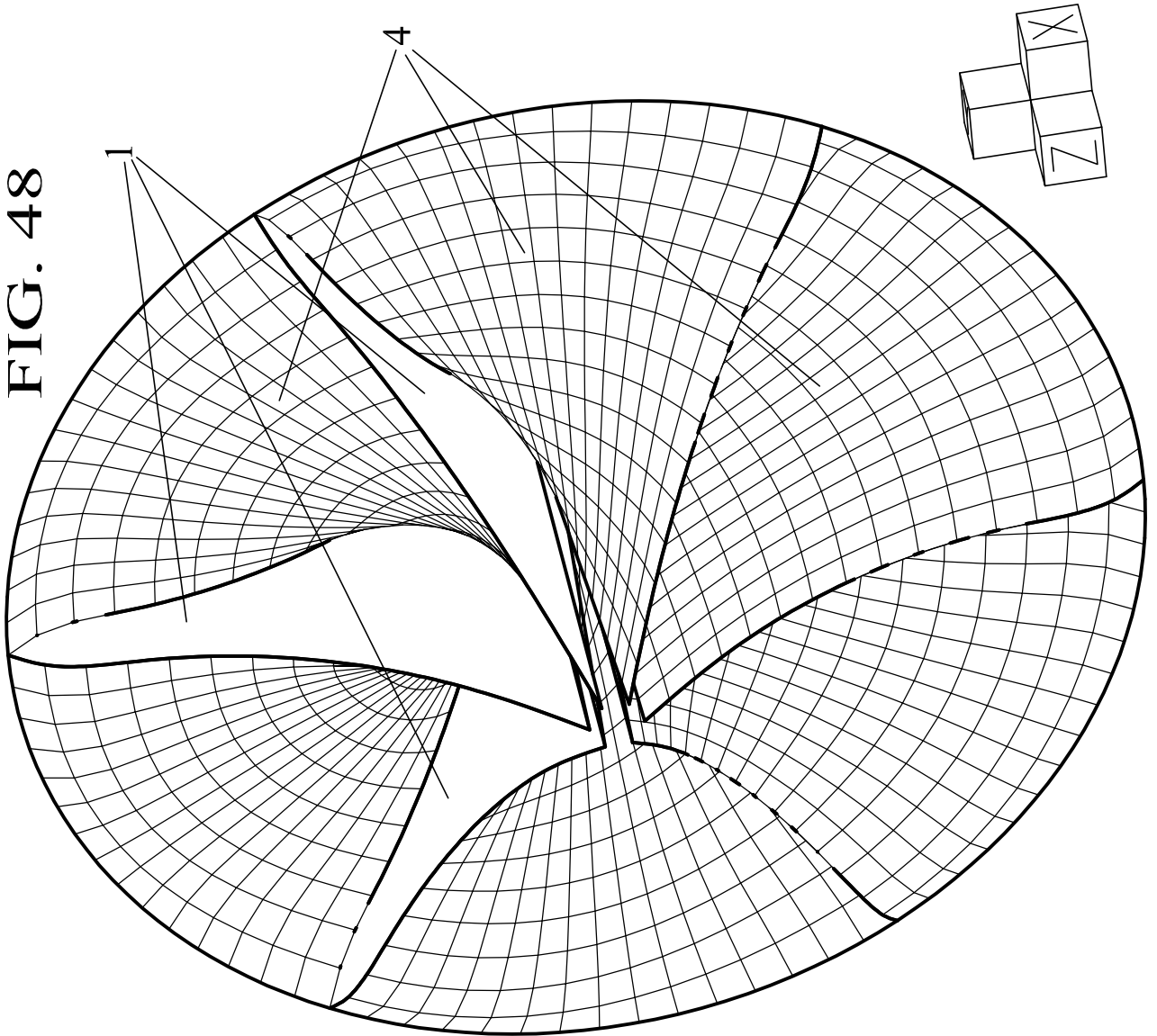


FIG. 50

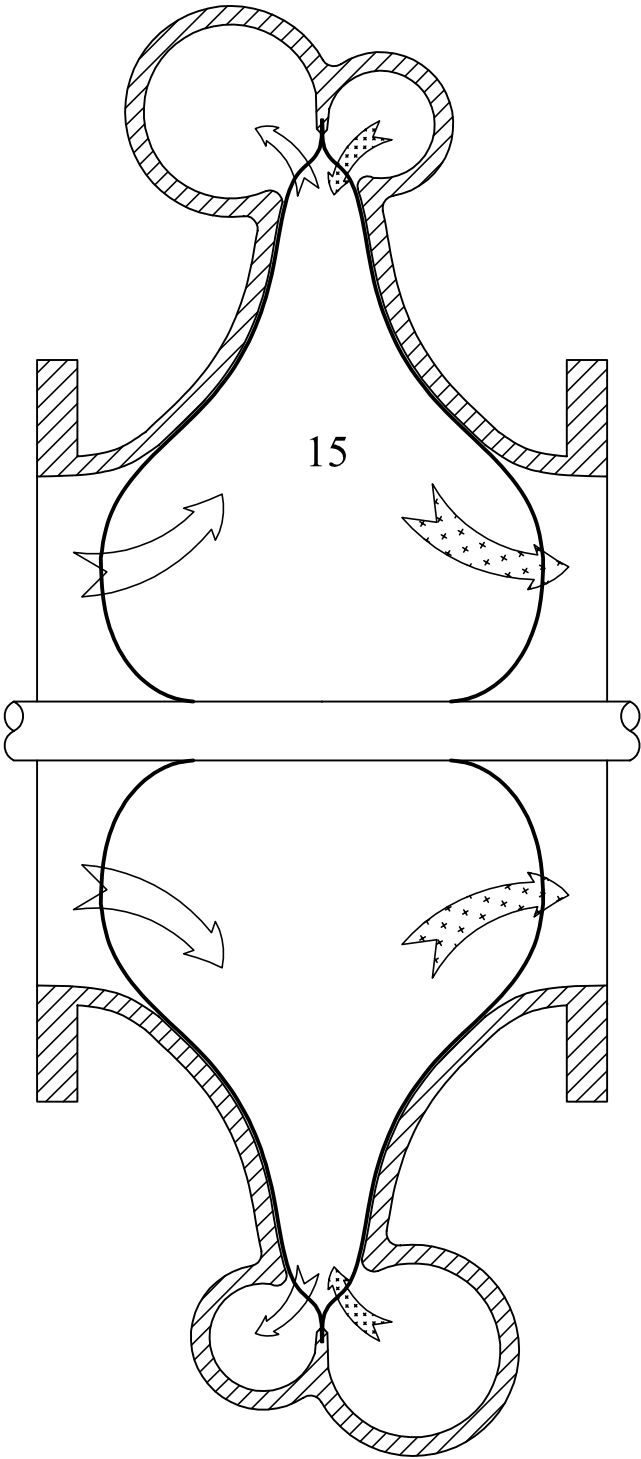


FIG. 51

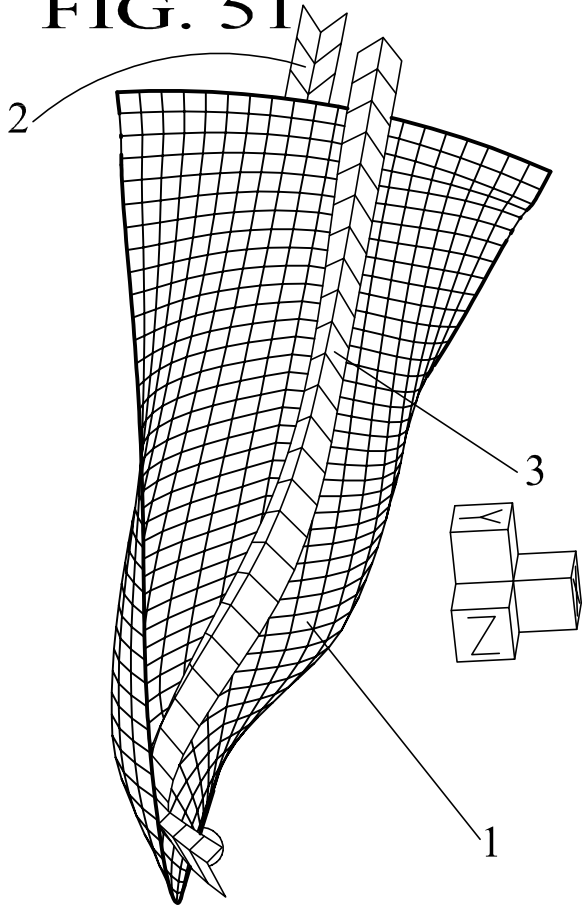


FIG. 52

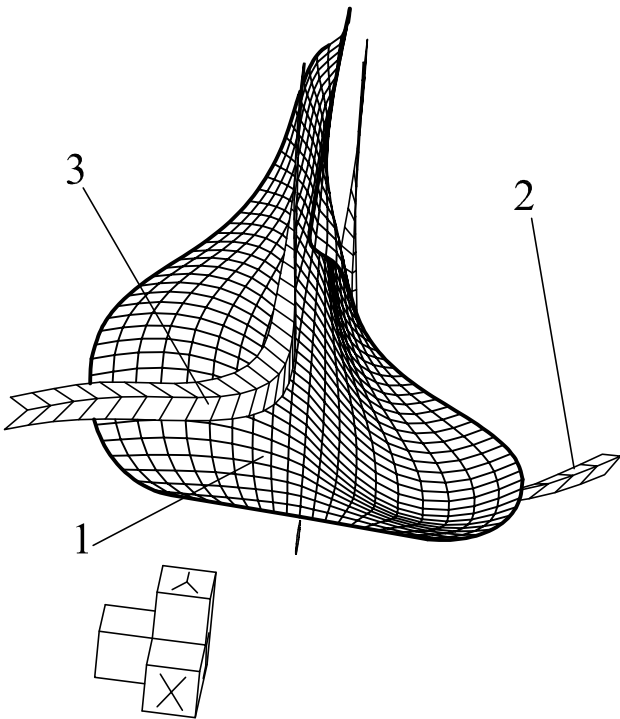


FIG. 54

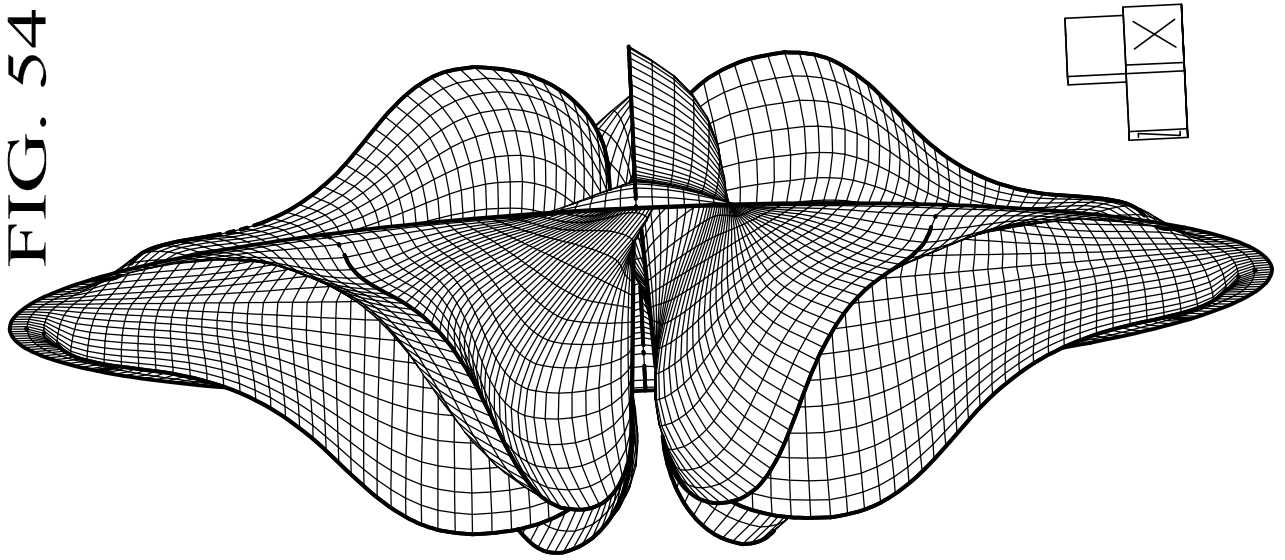


FIG. 53

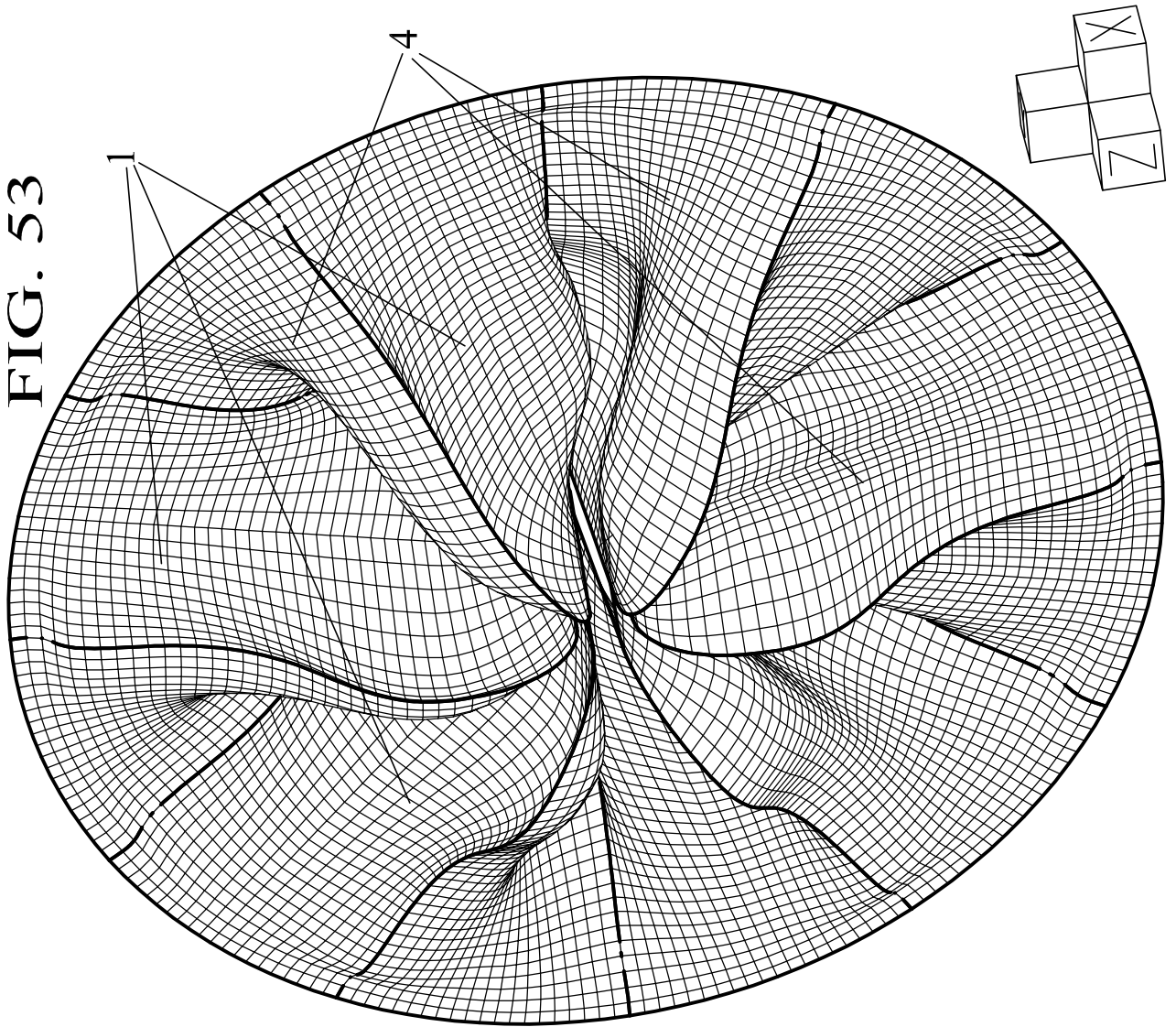


FIG. 55

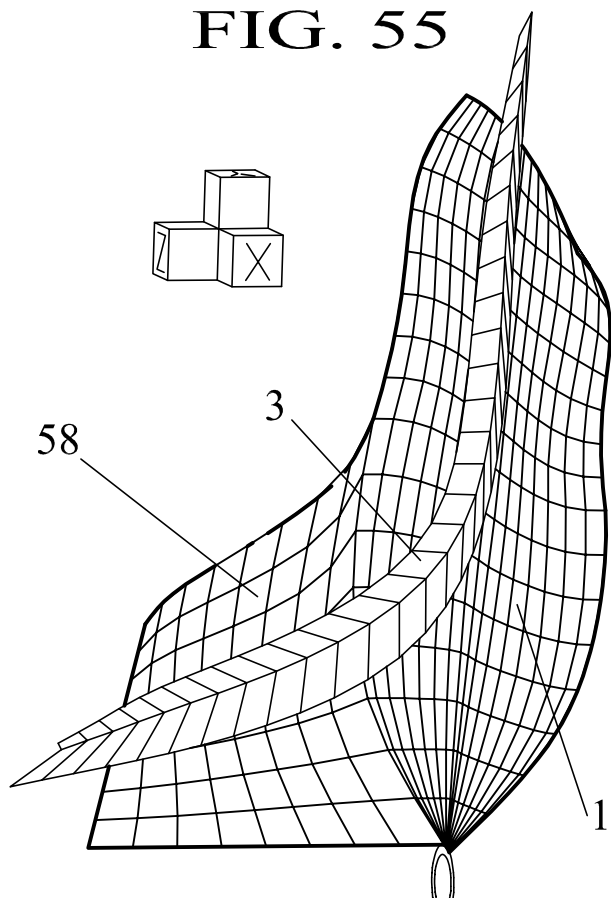


FIG. 56

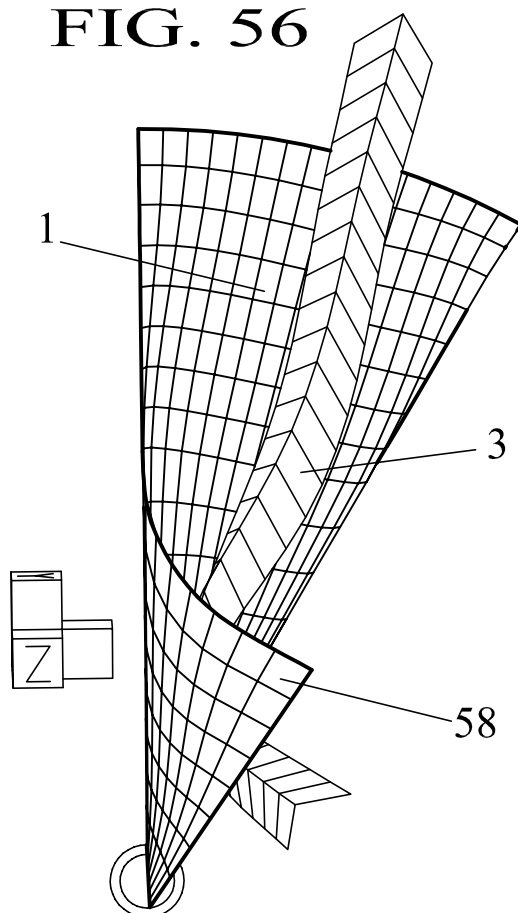


FIG. 57

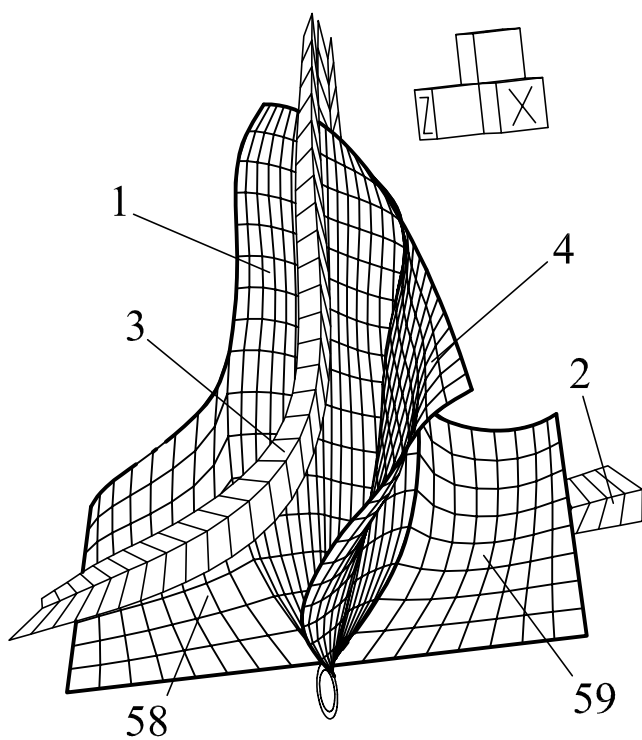


FIG. 58

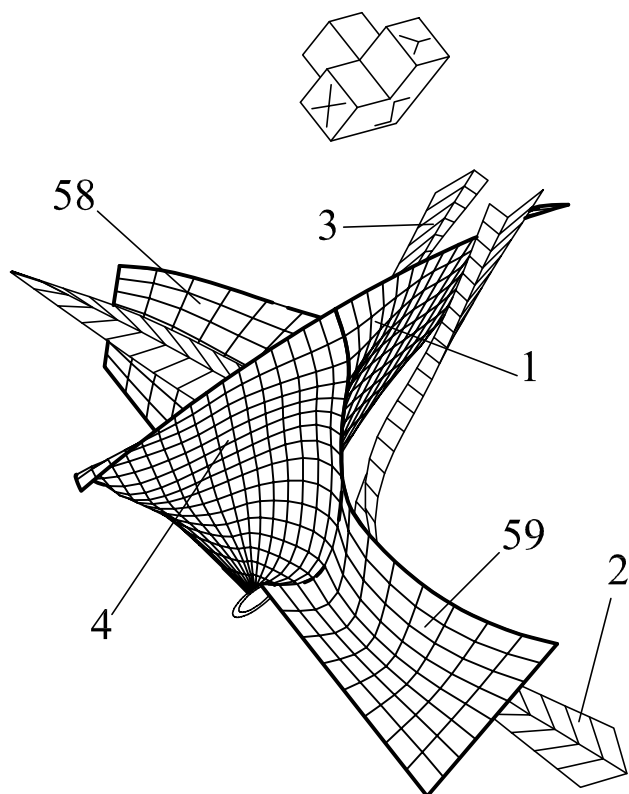


FIG. 59

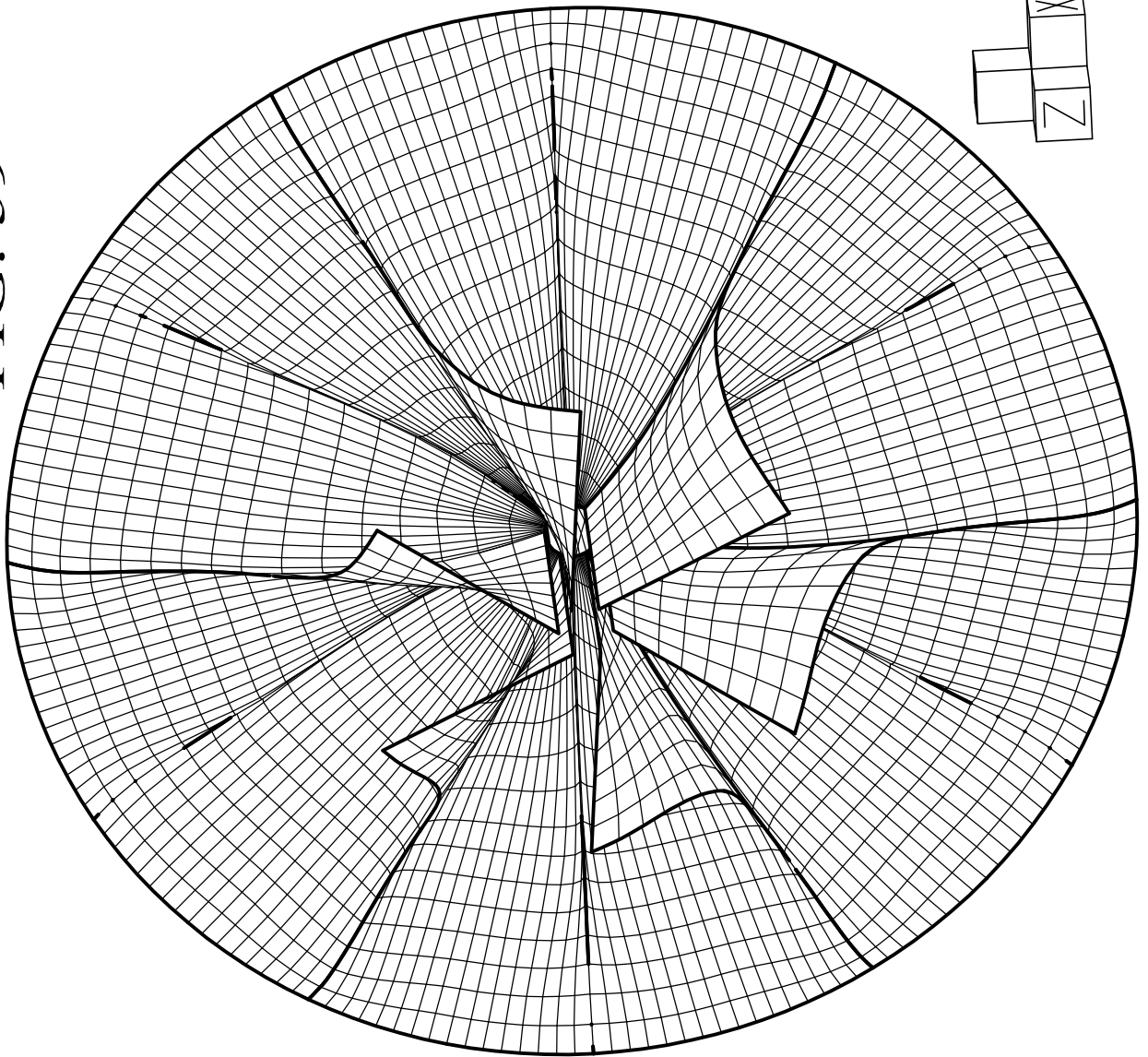


FIG. 60

