

滚珠轴承动量轮最佳运行状态的实验确定

卢靖华

(北京控制工程研究所)

摘 要

对于35牛顿·米·秒偏置动量轮,在轴承加载量为2公斤到10公斤范围内,环境真空度从 $1 \times 10^{-4}\tau$ 到1个大气压范围内,进行了实验研究。结果指出,在轴承预载为10公斤左右,环境真空度约为 1τ 时,达到最佳运行状态。稳态功耗小于8W,与国外同类产品一致。

一、前 言

飞轮装置作为空间飞行器姿态控制的执行机构之一,随着飞行器工作寿命的增长,控制精度的提高,愈来愈受到广泛重视。从发展趋势看,具有较高精度的三轴姿态稳定的空间飞行器越来越多的采用以飞轮装置为主的姿态控制器,而以质量喷射装置作为辅助系统。

长时间的空间工作环境及必须经受的发射段力学环境的考验,给飞轮装置的技术设计带来许多特殊要求。对飞轮滚珠轴承施加轴向预载,并使飞轮旋转体工作在一个气密的外壳内,是其中的两项基本措施。它保护飞轮装置轴承顺利通过发射段冲击、振动环境不受破坏,维持一个最佳的工作状态,以获得低功耗和长寿命。

轴承预载大小的选择要考虑到发射段力学环境考验,飞轮的工作性能要求,以及轴承本身的技术条件等。参照国内外已有的经验和相应的设计计算,可给出一个粗略的数值,而要求通过运行实验最终确定一个最佳值。

气密外壳将飞轮工作气氛与空间高真空环境隔开。综合考虑风阻、散热及轴承润滑剂的真空挥发损失,要求维持一个适中的真空度。这个数值的大小,同样要由飞轮运行实验来确定。

本文介绍35牛顿·米·秒偏置动量轮最佳运行状态的实验确定过程及主要结果。

二、实验概要及实验装置

选取动量轮的转速、功耗、轴承温升和断电停转时间,作为衡量其运行状态好坏的主要指标参数。这要求长时间记录飞轮每一工作状况下的输入电压、电流、转速、轴承温度,并定期读取飞轮在同一稳定转速下的断电停转时间。由电压和电流计算飞轮的功耗,并可由停转时间估算轴承的平均摩擦力矩。

为了模拟飞轮的实际工作气氛,获得接近于实际状况的工作环境,将飞轮装置取去外壳后平放在一个大口径真空罩内,采用断续抽气的方式,保持罩内一定的真空度数值。飞轮主轴向上端按装一加载机构,用单体重量1公斤的砝码组加载,以保证加载量的准确*)。实验装置

如图 1 所示。真空钟罩用真空机组抽气，能维持高达 $5 \times 10^{-6} \tau$ 的真空度。用电离复合真空计及低真空计可测量从 $1 \times 10^{-7} \tau$ 到 1 个大气压间的任一真空度数值。自动记录仪与直读仪表并用，以完成连续记录和保证数据可靠。每改变一种预载状况，要连续跑合五天到六天的时间到达稳定，在稳定运转的前提下，研究真空度和预载对飞轮工作状态的影响。

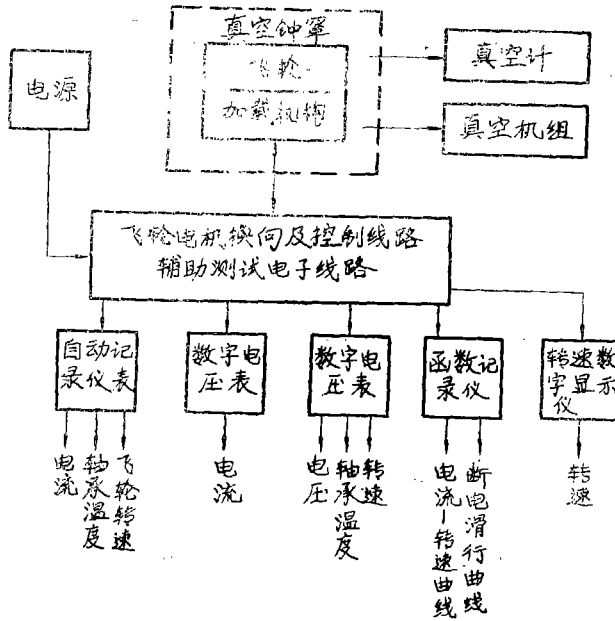


图 1 实验装置示意图

三、跑合——稳定取数的前提

每给定一个新的轴承预载值，需要一个连续运转过程，以得到稳定的工作状态，称为跑合。跑合过程的显著特点是滚珠轴承摩擦力矩逐渐减小，功耗降低而趋于稳定，运行状态可重复。35 牛顿·米·秒动量轮恒定加载 6 公斤下跑合过程中电流、功耗及滑行时间随跑合时间的变化数据列入表 1 中，轴承温度数据列入表 2 中。为使变化趋势明显起见，图 2 中，取稳态值为 1，分别以相对值作出随跑合时间的变化曲线。由于实验所处环境真空度下 ($3 \times 10^{-4} \tau$)，风阻力矩可略去不计。转速变动不太大时，电机的磁滞、涡流以及控制线路功耗近似为常值，因此，电机电枢电流和功耗随时间的变化，基本上反映了轴承摩擦力矩及轴承功耗的变化。如果忽略断电停转过程中的转子损耗，我们便由滑行时间计算出停转过程中的平均摩擦力矩 \bar{T}_f ，即由 $T_f = \frac{dH}{dt}$ ，得

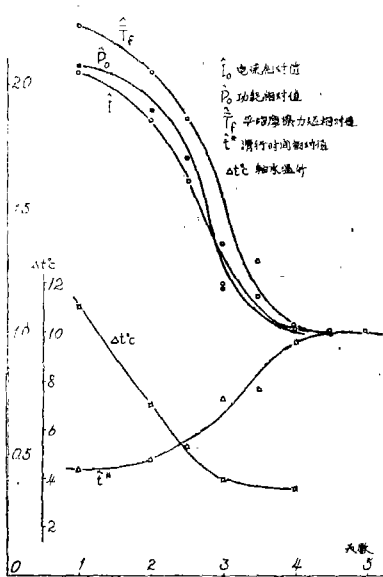


图 2

*) 加载量是指外加砝码的重量，由于转子自重 6 公斤，下轴承承载为此值与加载量之和。

$$\bar{T}_f = \frac{H_0}{n_0} \times \frac{n}{t^*} = 1.19 \times 10^2 \left(\frac{n}{t^*} \right)$$

式中 $H_0 = 35$ 牛·米·秒, $n_0 = 3000$ 转/分, t^* 以秒表示, 为滑行时间, n 表示断电滑行始点转速。

由图 2 可见, 轴承摩擦力矩、电机功耗, 以及轴承温升都随跑合时间的延续逐渐降低而达到稳定。这说明, 跑合, 对于飞轮的实验和使用是非常必要的。对于所实验的 35 牛·米·秒动量轮, 采用尺寸为 $\phi 62 \times \phi 25 \times 17$ 毫米的角接触式滚珠轴承, 跑合时间大约是 120 小时。

表 1: 加载 6 公斤, 真空度 $3 \times 10^{-4} \tau$, 转速 2000 转/分下, 动量轮输入电流 I_0 、稳态功耗 P_0 、滑行时间 t^* 以及停转过程中平均摩擦力矩 \bar{T}_f , 随跑合时间的变化数值。

表 1

No	实验值 跑合时间 (天)	I_0 (安)		P_0 (瓦)		t^*		\bar{T}_f (克-厘米)	
		实测值	相对值	实测值	相对值	实测值	相对值	实测值	相对值
1	1	0.479	2.056	3.013	2.384	17'42"	0.445	224.1	2.249
2	2	0.434	1.860	5.795	1.938	18'30"	0.436	215.2	2.059
3	2.5	0.378	1.620	4.952	1.708	21'14"	0.535	186.1	1.857
4	3	0.278	1.193	3.419	1.179	29'19"	0.736	135.3	1.358
5	3.5	0.267	1.116	3.284	1.132	30'51"	0.775	128.6	1.290
6	4	0.257	1.017	2.939	1.013	38'38"	0.971	102.7	1.031
7	4.5	0.234	1.004	2.907	1.002	39'48"	1.000	99.66	1.000
8	5	0.230	1.000	2.900	1.000				

表 2 轴承温升随跑合时间的变化数值

No	跑合时间 (天)	t_1 (°C(轴承温度))	t_0 (°C(室温))	Δt (°C(轴承温升))
1	1	27.58	16.5	11.08
2	2	24.59	17.5	7.09
3	3	22.02	18.0	4.02
4	4	21.16	17.5	3.66

四、风阻力矩——真空度的确定

为了定出一个适中的真空度变化范围, 来详细的研究不同真空度的环境气氛对飞轮运行特性的影响, 首先取 1τ 、 $1 \times 10^{-2}\tau$ 和 $1 \times 10^{-4}\tau$ 与一个大气压下的运行特性作了观察对比。结果指出, ** 真空度高于 1τ 时, 飞轮稳态功耗 P_0 、输入电流 I_0 以及滑行时间 t^* 对于真空度的变化曲线已趋于平坦, 而只是由于随着真空度的提高散热变差的缘故, 真空度高于 $1 \times 10^{-2}\tau$

**见实验报告: "35牛·米·秒动量轮第一次真空运行实验", 1982年1月

时, 功耗值稍微回升。因此, 我们选定从 $1 \times 10^{-1}\tau$ 到一个大气压之间作为仔细研究的区间, 判断风阻力矩与环境真空度的依赖关系, 并选择飞轮运行的最佳真空度数值。

1. 风阻力矩表达式

风阻力矩是实验和应用过程中要考虑的主要问题之一。轮体结构给定时, 其大小决定于转速和环境气氛的真空度。本实验在上述选定的真空度范围内, 取 8 个数值点。分别读取了完整的电流—转速曲线。由这些曲线得到风阻力矩与真空度及转速的依赖关系。

表 3 列出了固定转速下各测试量与真空度的关系。为了求出风阻力矩与转速的关系, 表 4 列出了真空度分别为 250τ 及 $3 \times 10^{-1}\tau$ 下的两组实验数据。

表 3: 加载 4 公斤, 转速 2000 转/分下, 动量轮输入电流、稳态功耗、滑行时间及轴承温升与环境真空度的关系

表 3

No	$P(\tau)$	$I_0(A)$	$P_0(W)$	t^*	$\Delta t^\circ C$	(***) $P_0(W)$ (电机功耗)
1	0.3	0.254	3.18	27' 57"	1.806	2.970
2	5	0.310	3.95	31' 17"	1.378	3.685
3	25	0.480	6.51	32' 53"	1.450	6.059
4	60	0.820	12.55	28' 48"	2.094	11.640
5	100	1.19	20.08	26' 08"	2.950	18.539
6	250	2.40	53.78	20' 33"	3.378	49.220
7	500	2.02(*)	32.24(*)	14' 41"(*)		28.786
8	760	2.10(**)	31.42(**)	12' 25"(**)		27.745

注: (*) 转速为 1305 转/分, (**) 转速为 1095 转/分, (***) $P_0 = U_0 I_0$, U_0 表示飞轮电机枢电压, 由外加电压减去约 1 伏管压降, 减去 0.5 欧取样电阻上压降得到。

表 4: 250τ 及 0.3τ 下两组电流—转速数据

$P(\tau)$ \ No		No								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
250	n(转/分)	1995	1730	1445	1295	1115	920	705	460	165
	I_0 (安)	2.398	1.83	1.33	1.09	0.844	0.626	0.424	0.254	0.140
0.3	n(转/分)	2145	1915	1560	1205	820	415	80		
	I_0 (安)	0.270	0.244	0.232	0.230	0.254	0.310	0.268		

(1) 固定转速下, 风阻力矩与真空度的关系

风阻力矩随着真空度的增高急剧减小。在真空度高于 1τ 时, 稳态电流 I_0 基本上保持不变, 这时, 可以认为电流 I_0 所对应的电磁力矩主要是用来克服轴承摩擦力矩以及电机的其它

阻动力矩。转速保持不变时，后者保持不变，即与环境真空度无关。因此，我们可以从表 3 的第一列数据中取出风阻力矩分量。对实测数据点真空度 P 及稳态电流 I_0 做线性拟合，给出很好的相关程度。用 \tilde{I}_0 表示稳态电流的拟合值，则有

$$\tilde{I}_0 = 0.279 + 8.59 \times 10^{-3} P \quad (4-1)$$

计算表格如表 5 所示。线性相关系数

$$r = 0.9992$$

相对均方根偏差 $\sigma = 1.3\%$ 。表达式中，与真空度成正比的部分代表克服风阻力矩的电流分量，用 \tilde{I}_w 表示，常值项表示克服轴承摩擦力矩及电机阻动力矩的电流分量。给定电机的力矩常数 $k_M = 566$ 克-厘米/安，则可写出风阻力矩表达式：

$$\tilde{T}_w = k_M \tilde{I}_w = 4.862 P \dots\dots\dots (4-2)$$

($n = 2000$ 转/分)

式中 P 以 τ 计， \tilde{T}_w 以克·厘米计。

表 5 转速 2000 转/分下，风阻力矩与环境真空度之间的计算数据

No	P (τ)	I_0 (A)	\tilde{I}_0	ΔI_0	\tilde{I}_w	\tilde{T}_w (g·cm)
1	0.3	0.254	0.282	0.0276	0.0026	1.459
2	5	0.310	0.322	0.0120	0.0430	24.310
3	25	0.480	0.494	0.0138	0.2148	121.549
4	60	0.820	0.794	-0.0256	0.5154	291.716
5	100	1.19	1.138	-0.0520	0.8590	486.194
6	250	2.40	2.427	0.0265	2.1480	1215.465

(2) 固定真空度下，风阻力矩与转速的关系

由表 5 可知，当 $P = 0.3\tau$ 时， $\tilde{I}_w \approx 0.01 I_0$ ，即相比之下，风阻力矩可略去不计。因此，表 4 中， $P = 0.3\tau$ 的一组数据，实际上是表示克服风阻以外的其他阻动力矩所消耗的电流与转速的关系。表中，较低真空度 $P = 250\tau$ 下的一组数据，则同时包含了前者。这样，取同一转速下两条数据曲线之差，我们便得到 $P = 250\tau$ 时，风阻力矩与转速的关系。由表 4 作出图

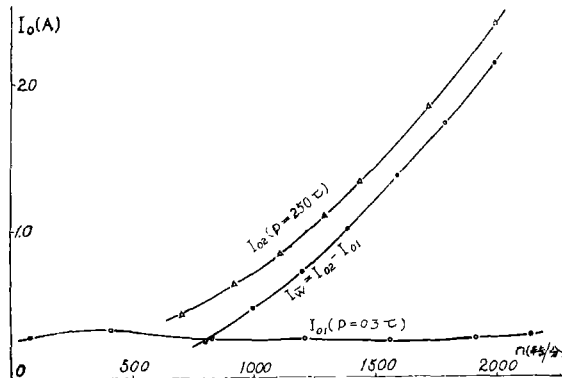


图 3 计算 $I_w \sim n$ 关系

3, 根据图 3 得到的数据, 得到关系式:

$$\tilde{T}_w = 2.32 \times 10^{-5} \times n^{2.344} \dots \dots \dots (4-3)$$

($P = 250\tau$)

式中 n 以转/分表示。计算表格见表 6, 相对均方根偏差 $\sigma = 2.3\%$; 式 (4-3) 两端取对数, 风阻力矩 \tilde{T}_w 的对数值与转速 n 的对数值, 线性相关程度 $r = 0.9978$ 。

(3) 风阻力矩表达式

在 $n = 2000$ 转/分、 $P = 250\tau$ 下, 对比式 (4-2) 和式 (4-3) 的计算值, 得到相对误差约为 4%。合并二式, 得到表达式:

$$\tilde{T}_w = 9.088 \times 10^{-8} P n^{2.344} \dots \dots \dots (4-4)$$

式中 \tilde{T}_w 以克-厘米计, P 以 τ 计, n 以转/分计。

表 6 计算环境真空度 250τ 下, 风阻力矩与转速的变化关系数表

No	1	2	3	4	5	6	7
n	2000	1800	1600	1400	1200	1000	800
I_w	2.142	1.717	1.355	1.008	0.708	0.467	0.242
T_w	1212.37	991.82	766.93	570.53	400.73	264.32	136.97
\tilde{T}_w	1267.95	990.48	751.53	549.56	382.90	249.74	148.02

注: I_w, T_w 由图 3 曲线求出。

为了检验式 (4-4) 的使用可信赖程度, 由式 (4-4) 可得出不同真空度和转速下的稳态电流 I_0 的表达式 (4-5), 其计算数据和实验数据的比较列于表 7。

表 7 稳态电流数据比较

No	P	n	I_0	\tilde{I}_0	$\frac{I_0 - \tilde{I}_0}{I_0}$
1	760	1095	2.10	1.904	0.093
2	760	705	0.951	0.858	0.101
3	500	1305	2.02	1.842	0.033
4	500	1075	1.40	1.504	0.069
5	500	790	0.826	0.776	0.060
6	250	1995	2.398	2.163	-0.026
7	100	1725	0.924	0.100	0.026
8	60	2020	0.832	0.818	0.017
9	25	1905	0.454	0.475	-0.016
10	5	2040	0.312	0.325	-0.042
11	0.3	2145	0.270	0.282	-0.045

均方根值: 0.059

$$I_0 = 0.279 + 1.606 \times 10^{-10} P n^{2.344} \dots\dots\dots (4-5)$$

可以看到，其相对偏差约为5.9%，由于环境条件的控制不十分严格，虽有约6%误差，这种电流值的估计关系式，因而力矩表达式(4-4)，认为是可信赖的。

2. 轴承温升估计

最简单的热路模型下，我们认为飞轮的散热是由基座热传导和空气对流两部分组成。飞轮罩内气体的对流放热，设想为受迫的亚音速(轮沿最大线速度约60米/秒)气流在管内流动时的放热，则热导与气流速度和气体密度的积的0.8次幂成正比。忽略壳内气体温度变化所产生的影响的，可以认为真空度 P 与气体密度成正比。等值热路时示意图如下。其中 G_1 表示通过基座到外界的热传导散热热导， G_2 表示由于空气对流作用到外界的热导。可设 $G_2 = k(nP)^{0.8}$ 。图中， P_a 表示消耗在飞轮内部的功效， t_1 及 t_0 分别表示轴承及外界温度，即室温。

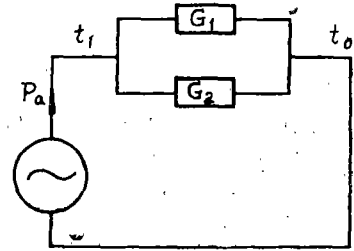


图4

$$\frac{P_a}{G_1 + G_2} = t_1 - t_0 \dots\dots\dots (4-6)$$

代入 G_2 值，得到

$$\frac{P_a}{\Delta t} = G_1 + k(nP)^{0.8} \dots\dots\dots (4-7)$$

由表4实验数据，按照式(4-7)拟合，计算表格如表8所示。分别以 $P_a/\Delta t$ 及 $(nP)^{0.8}$ 为变量，线性相关系数 $r = 0.9879$ ；相对均方根偏差约为8.18%。得到轴承估算温升

$$\tilde{\Delta t} = \frac{P_a}{1.703 + 3.396 \times 10^{-4} \cdot (nP)^{0.8}} \dots\dots\dots (4-8)$$

均方根偏差的绝对值约为0.29℃，主要是由于室温基准取数误差较大，它在温升较小的情况下，明显的反映出来，引起温升取数较大误差。

根据式(4-8)，在转速3300转/分，真空度 1τ 下，设为满载运行，电流取1.5安，电压24伏时，则可得到估计温升

表8 轴承温升估计数据表

No	P	n	$P_{\text{回}}$	$\tilde{\Delta t}$	Δt	$\Delta t - \tilde{\Delta t}$
1	0.3	2000	2.970	1.806	1.688	0.1182
2	5	2000	3.685	1.378	1.644	-0.2662
3	25	2000	6.059	1.450	1.658	-0.2084
4	60	2000	11.640	2.094	2.067	0.0273
5	100	2000	18.539	2.950	2.434	0.5157
6	250	2000	49.220	3.378	3.513	-0.1352

均方根偏差: 0.2875

$$\tilde{\Delta}t = \frac{1.5 \times 24}{1.703 + 3.396 \times 10^{-4} \times (3300)^{0.8}} = 18.704(\text{C})$$

与实验值大致符合。实际的轴承工作温度，一般限制在65℃以下。

3. 最佳真空度的确定

动量轮工作气氛真空度的选择要考虑到以下几个因素：

- (1) 风阻力矩
- (2) 轴承温升
- (3) 轴承润滑剂的挥发
- (4) 真空密封技术

转速不变时，真空度降低，则对流散热作用增强，有降低轴承温升的趋势。但同时由于空气密度增大，风阻增大，功耗加大，有增高温升的倾向。因此，从轴承温升看，存在一个合适的真空度区域，使温升最低。式(4-8)中，代入工作转速下稳态功耗的计算值

$$\tilde{P}_s = \tilde{I}_0 (k_s n + R_s \tilde{I}_0) \dots\dots\dots (4-9)$$

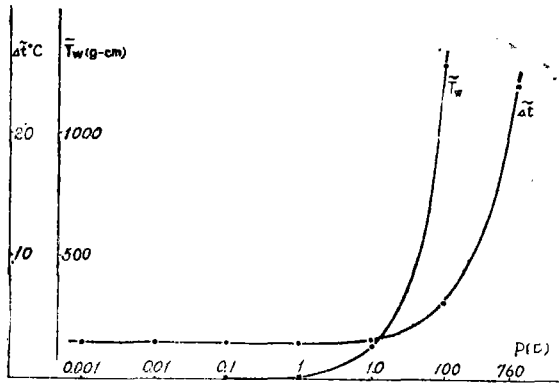


图5 风阻力矩，轴承温升~真空度曲线(n=3000)

式中， I_0 按(4-5)式计算，反电势常数 $k_s = 5.77$ 伏/千转/分。电机每相绕组电阻约为1.2欧，设铁耗与铜耗近似相等，取电机等效损耗电阻 $R_s = 2.4$ 欧。得到：

$$\tilde{\Delta}t = \frac{(5.77 \times 10^{-8} \cdot n + 2.4 \tilde{I}_0) \tilde{I}_0}{1.703 + 3.396 \times 10^{-4} \cdot (nP)^{0.8}} \dots\dots\dots (4-10)$$

由此，我们可近似估计额定偏置转速下，温升与真空度的关系，从而在温升不大的区域内选定真空度值。

式(4-10)代入 $n = 3000$ 转/分，得到 $\tilde{\Delta}t \sim P$ 曲线，如图5所示，计算数据如表8所示。真空度在10 τ 以上时，温升变化比较平缓，而在 $P = 1.569\tau$ 时，得到计算最小值 $\tilde{\Delta}t = 2.845$ (C)。

表9 n=3000时， $\tilde{\Delta}t \sim P$ 计算值

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P	0.001	0.01	0.1	1	1.569	2	3	4	5
$\tilde{\Delta}t$	2.944	2.939	2.915	2.851	2.845	2.848	2.866	2.894	2.927

№	10	11	12	13	14	15	16	17
P	6	25	60	100	250	500	760	10
$\tilde{\Delta}t$	2.964	3.721	4.886	6.045	10.051	16.785	24.145	3.126

为了检查式(4—10)的可信赖程度,对于 $n=2000$ 转/分时的计算值与实测值的比较如表(4—8)。除去 $P=100\tau$ 点外,其余误差皆在 0.5°C 以内。在 $P=15\tau$ 时,达到温升最小值 $\tilde{\Delta}t=1.662(^\circ\text{C})$

表10: $n=2000$ 转/分时, Δt 的数值比较

$P(\tau)$		0.3	5	25	60	100	250
$\tilde{\Delta}t$ ($^\circ\text{C}$)	计算值	1.893	1.718	1.684	1.871	2.115	3.016
	实测值	1.806	1.378	1.450	2.091	2.950	3.378
	误差	0.087	0.340	0.234	-0.223	-0.835	-0.362

当 $n=3000$, $P=1$ 时,对流热导 $G_2=0.205$, 占总热导的约 10.7% , 因此可以认为散热主要由传导散热热导决定。而后者,则主要取决于飞轮安装部位,即机械接口的热导,因为安装飞轮的基础是一个相当大的散热体。这样,由于安装方式相似,在实验装置上得到的实验结果,便可以近似地应用于实际工作情况下估计飞轮轴承的温升,并确定真空度环境。

在图5上,同时做出了 $n=3000$ 时风阻力矩与真空度的关系:

$$\tilde{T}_w \Big|_{n=3000} = 12.851P(\text{g}\cdot\text{cm}) \dots\dots\dots (4-11)$$

直观地可见,在 $P \leq 1$ 时,风阻力矩,就其绝对值来说,已大为减小。

考虑到轴承润滑剂在真空度提高时挥发损失加快;以及真空度愈高,气密外壳密封技术愈困难。综合以上结果,选择壳内真空度为 1τ 或稍低一些是合适的。这与国外有关报导吻合。

五、轴承摩擦力矩——预载的确定

弹性流体动力薄膜润滑方式的滚珠轴承,其工作特性和使用寿命受到轴承预载大小的影响,然而其间的关系却很复杂,难于用一个确定的数学表达式来描述。飞轮装置中,对滚珠轴承施加轴向预载的另一个原因是防止轴承内外座圈与滚珠间出现间隙(卸载),增大轴承刚度,减小振动和噪声,防止由于惯性力所引起的滚珠与内外座圈滚道间的相对滑动。从而避免在恶劣的动力学环境中受到损坏,并保证飞轮主轴的平稳运转,适应加工零件的精度。对于给定的轴承结构和润滑条件。我们从实验的观点出发,改变不同的预载值,记录飞轮的工作特性参数,判断轴承的运行状况,以确定出最优的数值。实验数据如表11所示。其中对应于加载值为 2, 4, 6, 8 和 10 公斤共五档,在各自跑合稳定后,记录了飞轮的转速——电流特

性以及滑行时间。实验过程中，环境真空度气氛维持在 0.3τ 左右，是考虑到这种情况下风阻力矩可忽略不计，温升也不致太高。因此，电流 I_0 所产生的电机电磁力矩主要是用于克服轴承摩擦力矩 T_f ，电机的磁滞、涡流以及齿咬力矩则附加以较小的误差，并且在稳速转动或同一速度变化间隔下断电停转过程中，或者保持不变，或者消失。这使得我们可以用根据稳态电流 I_0 以及停转滑行时间 t^* 得到的平均摩擦力矩 $\overline{T_f}$ 来衡量轴承的工作状况。

表 11 $P = 0.3\tau$ 下，飞轮工作特性与加载量的关系

No		加载量		4	6	8	10
		(2kg)					
1	n (转/分)	1980	2145	2035	2085	2085	
	I_0 (安)	0.544	0.270	0.236	0.246	0.260	
	P_0 (瓦)	7.616	3.621	2.978	3.186	3.377	
2	n	1620	1915	1930	1925	1925	
	I_0	0.680	0.244	0.230	0.236	0.238	
	P_0	7.296	2.933	2.765	2.837	2.861	
3	n	1245	1560	1590	1585	1580	
	I_0	0.652	0.232	0.218	0.204	0.226	
	P_0	0.520	2.318	2.200	2.042	2.267	
4	n	945	1205	1235	1240	1230	
	I_0	0.586	0.236	0.204	0.196	0.206	
	P_0	4.688	1.897	1.642	1.580	1.652	
5	n	663	820	860	875	865	
	I_0	0.482	0.254	0.200	0.190	0.196	
	P_0	2.892	1.521	1.202	1.144	1.178	
6	n	315	415	495	515	515	
	I_0	0.262	0.310	0.208	0.186	0.174	
	P_0	1.048	1.237	0.840	0.753	0.696	
7	n	75	80	95	95	90	
	I_0	0.276	0.268	0.260	0.250	0.272	
	P_0	0.522	0.536	0.525	0.500	0.547	
8	滑 行	n	1977	2140	2160	2005	2075
	时 间	t^*	17'53"	29'54"	43'01"	44'43"	38'00"

表12及图6中，做出了稳态转速 $n = 2000$ 时的轴承摩擦力矩 T_f ，以及自稳态转速 $n = 2000$ 断电滑行到停转过程中的平均摩擦力矩 $\overline{T_f}$ 与加载量的关系。

表 12 摩擦力矩与加载量的关系

No	摩 擦 力 矩	加 载 量				
		2(kg)	4	6	8	10
1	T_f $n=2000$	312.4	143.8	133.6	136.4	140.4
2	T_f $n=1000$	338.5	139.2	113.8	108.7	113.2
3	\bar{T}_f $n=(2000\sim 0)$	219.3	142.0	99.6	88.9	108.3

细看表11中加载量为 2 公斤的一组数据，会发现随着转速的升高，电流 I_0 增加，出现一峰值，然后开始减小。加载量 2 公斤时，这一“鼓包”的中心约在 $n = 1600$ 的区域附近。随着加载量的加大，“鼓包”中心所对应的转速区域下降。加载量大于 6 公斤时，从实验数值看，已在 100 转/分以下，对于偏置动量轮来讲，要求在工作转速范围内(2700~3300)，轴承摩擦力矩平稳，选用较大加载量可满足这一要求。

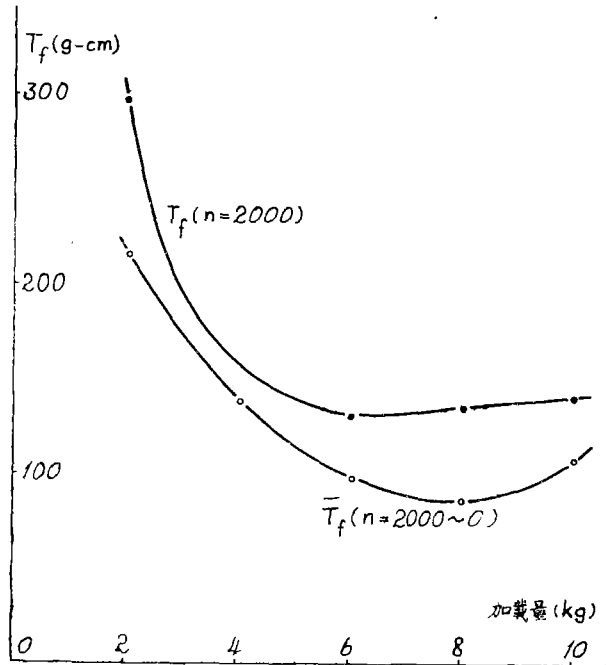


图 6

由表12及图 6 看，稳态摩擦力矩 T_f 在加载量 (6~8) 公斤范围内取得最低值，平均摩擦力矩 \bar{T}_f 在 8 公斤附近取得最低值。因此，就实验结果看，取 7 公斤左右的轴承加载量较为合适。实验过程中，飞轮平放，下轴承多承受到 6 公斤的转子自重，因此对于下轴承最佳预载应是 13 公斤。或者，我们取二者平均值，认为轴承预载量都是 10 公斤。

六、结 论

滚珠轴承动量轮最佳运行状态的实验确定，作为动量轮实验研究的一个组成部分，提供了动量轮设计研究的定量基础。整个的实验程序和分析方法以及许多实验结果可直接移植到或稍加修正后应用到动量轮的产品设计选择和性能标定过程中。

实验结果指出，对于35牛顿·米·秒偏置动量轮，采用上述实验确定最佳真空度为 1τ 左右，最优预载量为10公斤左右。