

文章编号:1000-582x(2001)02-0005-04

## 环式减速器发热问题分析

朱才朝<sup>1</sup>, 秦大同<sup>1</sup>, 冉振亚<sup>1</sup>, 孙士雅<sup>2</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学工商管理学院, 重庆 400044)

**摘要:**在对N型内齿行星齿轮传动的基本结构形式——单环、双环、三环及四环减速器的基本结构和传动机理分析的基础上,对环式减速器的发热问题进行了研究,探讨了引起环式减速器发热的主要原因和部位,发现箱体支承轴承和环板高速轴承发热严重是主要发热源。提出了解决发热问题的具体措施,该措施经实验验证很好地解决了环式减速器的发热问题,提高行星轴承及减速器的使用寿命,具有重要的工程实用价值。

**关键词:** 减速器; 传动机理; 发热

**中图分类号:** TH 132.4

**文献标识码:** A

平行轴少齿差环式减速器——单环、双环、三环及四环减速器是我国提出的新型齿轮传动装置,分别获国家发明专利和实用新型专利,专利号分别为: ZL89213292. 2、ZL91230087. 6、CN85106692. 5、ZL93239404. 3,该传动装置与现有各种主要齿轮传动形式相比,具有结构简单、体积小、重量轻、传动比大、传动效率高、承载能力大、过载能力强等一系列优点<sup>[1,2]</sup>,可广泛应用于机械、冶金、石油、建筑、水力及水泥、交通等工业领域。特别是三环减速器和两环减速器因出现时间早,在各大工业领域中都得到了一定的应用。

环式减速器在应用过程中出现的主要问题是高速( $n > 1000$  r/min)重载情况下振动噪声大、温升高及轴承早期破坏等。在连续运转、重载、高速、大传动比工况下问题更为突出,大大影响了其推广进程,成为亟待解决的关键技术难题。目前国内开展环式减速器的研究主要以三环减速器为主,集中在对其传动机理、运动学和动力学分析及振动和噪声方面<sup>[1-3]</sup>,对环式减速器发热问题的研究相对较少。笔者对环式减速器发热问题进行研究,探讨引起环式减速器发热的主要原因,提出解决发热的具体措施,从根本上解决发热问题,以提高行星轴承及减速器的使用寿命,具有重要的

工程实用价值。

### 1 环式减速器基本结构及传动原理

渐开线少齿差行星齿轮传动按传动形式可分为N型(K-H型)和NN型(2K-H双内啮合型)两大类<sup>[3]</sup>,N型内齿行星齿轮传动的基本结构形式之一——环式减速器,目前已出现单环、双环、三环、四环及平衡环式减速器,如图1是三环减速器基本结构<sup>[1]</sup>。与此类似,四环减速器是具有四个偏心轴颈的高速轴,四个传动内齿轮通过轴承安装在高速轴上,四个内齿轮与外齿轮啮合来传递运动和动力,啮合瞬时相位差呈 $90^\circ$ 。

图2是两环减速器的基本结构简图,为了安装方便,环式减速器两高速曲轴都是通过两根高速轴上加偏心套来实现偏心曲轴,轴和偏心套之间用平键联接。四环减速器四偏心套互成 $90^\circ$ ,三环减速三偏心套相位互 $120^\circ$ ,两环减速器两偏心套互成 $180^\circ$ 。

环式减速器的传动原理为:当输入轴旋转时,行星内齿轮不是作摆线运动,而是通过一双曲柄机构(具有偏心轴颈的高速轴)引导作圆周平动<sup>[1]</sup>。高速轴与低速轴的回转方向相反,其传动比的计算公式如下:

• 收稿日期:2000-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50005025)

作者简介:朱才朝(1967-),男,湖北麻城人,博士后,重庆大学机械学院副教授。主要从事传动系统动力学及振动与噪声控制的研究。

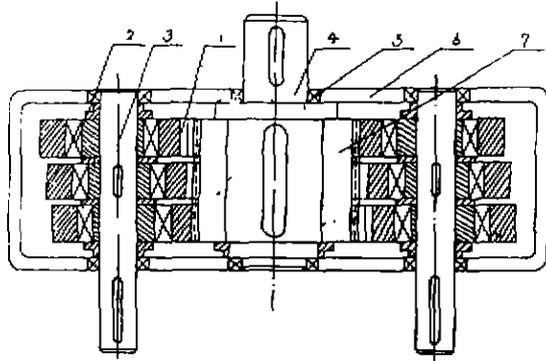


图1 三环减速器基本结构

- 1—内齿行星轮;2—转臂轴承;3—转臂偏心输入轴;
- 4—输出轴;5—支承轴承;6—机架;7—外齿轮

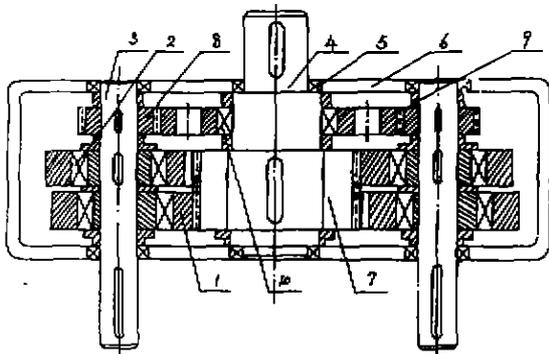


图2 两环减速器基本结构

- 1—内齿行星轮;2—转臂轴承;3—转臂偏心输入轴;
- 4—输出轴;5—支承轴承;6—机架;7—外齿轮;8—
- 过桥小齿轮;9—过桥大齿轮;10—空套轴承

$$i = -\frac{z_1}{z_2 - z_1}$$

式中： $z_1$ —外齿轮齿数； $z_2$ —内齿轮齿数。

负号表示与回转方向相反。内齿轮类似与行星轮，因外齿轮直接输出，故没有一般行星齿轮的行星架或少齿差传动的输出机构，简化了机构，同时保留了同轴

传动减速器的传动比大和结构紧凑的优点。

## 2 实验测试及分析

因环式减速器的基本结构组成及其传动原理基本相同，这里以 SHQ40 型三环减速器为例进行实验研究，其基本设计参数为：内外齿轮的齿数  $z_1 = 60, z_2 = 63$ ，传动比  $i = 20$ ，模数  $m = 4 \text{ mm}$ ，中心距为  $a = 400 \text{ mm}$ ，输入转速  $n = 1\ 000 \text{ r/min}$ ，额定功率  $p = 10 \text{ kW}$ 。测试实验在电封闭齿轮实验台上进行，测试系统采用美国 probeye3300 红外热成像系统，它主要由红外探测器、监测处理器及显示器组成。如图 3 所示。系统工作原理是：被测物体表面在一定温度下辐射的红外信号在红外探头视场中经光学扫描机械依次用“瞬间视场”扫描。由光敏元件阵列接受转化为电信号之后由监测处理系统进行放大，采用 A/D 及处理后形成图象信号在 CRT 显示器上输出温度图象。

实验过程是先在不同转速情况下，空载跑合达热平衡；再逐渐分级加载跑合达热平衡。再清洗换油后在额定工况下运转到热平衡时，对箱体表面温度场进行测试，然后打开箱体上端盖，测试输入轴一侧环板温度场。通过测试看出环板高速轴轴承孔附近是集中的高温区，其温度明显高于齿圈及外齿轮以及环板其它部分。但在环板工艺孔或齿轮与齿圈间隙处存在虚假的高温区，这是由于深孔或深缝产生的“黑体”效应所致。这一结果表明传动结构中环板高速轴轴承发热最严重，是主要热源。环板轴承孔附近温度场分布沿周向不均匀，高温区沿轴心连线方向延伸较大，等温线呈近似椭圆或卵形，表明偏心套轴承周向发热不均，沿连心线方向发热严重，这与死点冲击有关，环板过死点时将受到较大的双向冲击，加工与安装精度误差则会增加死点冲击力。转速提高将会增加冲击频率，恶化轴承工作条件使温升更严重，这可能是导致轴承早期破坏的重要原因之一。箱体外部轴承温度场也以高速轴轴承附近区域温度为最高，但温度的周向分布较环板处

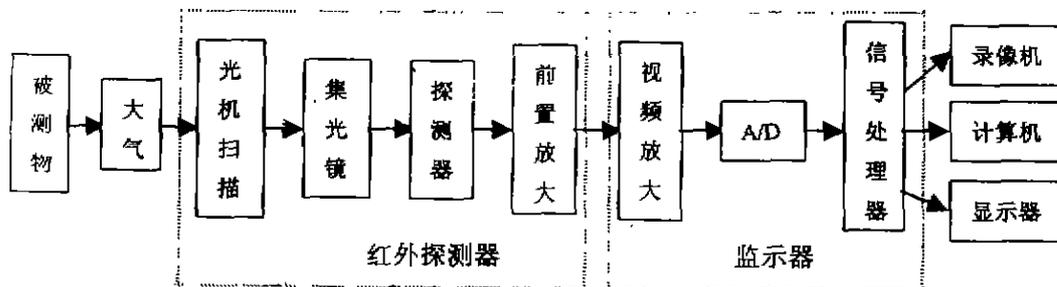


图3 probeye3300 红外测温系统

更均匀,这表明冲击载荷大部分为超约束封闭传动机构承受,该处轴承载荷在周向时间平均意义上是均匀的。

测试结果证明三环减速器箱体支承轴承及环板高速轴承是主要发热源,其中高速轴输入轴轴承更为严重。环板上高速轴承附近区域温度场等温线呈卵性,轴孔中心连线方向温度更高,对照振动测试结果可知,这是死点冲击载荷所引起。

### 3 偏心套微动磨损分析

在三环减速器中,高速轴上要加工3对偏心轴颈,依次安装3个传动环板。由于中间一块环板的安装比较困难,一般采用图4所示的偏心套结构,高速轴1与偏心套2、3、4之间通过平键联接,轴与偏心套之间为过盈配合(H7/p6),而偏心套通过轴承2与齿板相连。从设计角度分析,这种结构除键槽加工的分度精度要求高( $120^\circ \pm 15''$ ),行星轴承装拆较困难外,并没有什么不合理之处。但是,在减速器使用过程中,用户反映高速轴轴承发热现象十分严重,常造成行星轴承早期损坏。研究发现,这种现象同偏心套和轴配合面间产生的微动磨损有关<sup>[5]</sup>。

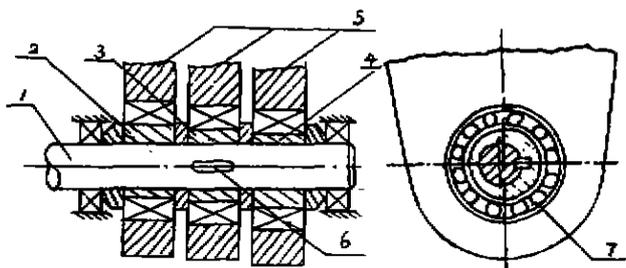


图4 高速轴偏心套结构

1—高速轴; 2、3、4—偏心套; 5—环板; 6—平键; 7—环板轴承

在摩擦学中,微动是指一种接触状态,在此状态下,两个接触表面间承受周期性的低振幅滑移( $A \leq 0.25 \text{ mm}$ )。由于相互接触的零件表面都具有一定的粗糙度,两表面的接触均为表面较高微凸体的接触,接触微凸体在载荷的作用下发生塑性变形,并产生粘着,在表面的相对滑移过程中被撕裂、脱落,造成表面磨损,这种现象称为微动磨损,又叫微振磨损。在微动磨损过程中会产生大量的热,零件表面温度升高,同时磨屑不断从接触表面内排出,使整个表面的严重损伤或失效,影响到整个系统的性能。由于微动磨损造成的表面损伤称为微动损伤。

接触表面的周期性相对滑移是产生微动磨损的必要条件,在三环减速器中,高速轴与偏心套之间是通过平键来传递转矩的,而平键与轴和偏心套上的键槽之间都存在一定的侧向间隙,如果作用于偏心套上的力矩正负交替变化,偏心套就会在图5所示两极限位置之间来回摆动,高速轴与偏心套配合表面间将产生微小的周期性相对滑移,从而引起微动磨损。

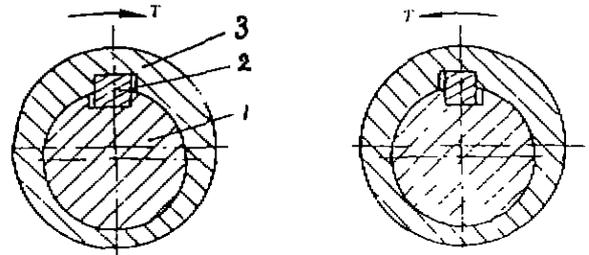


图5 偏心套的微动现象

1—高速轴; 2—平键; 3—偏心套

在通常情况下,用平键连接的零件之间传递的力矩都是方向恒定的,即平键与轴和偏心套上的键槽之间存在一定的侧向间隙,接触表面也不会产生相对滑动,一般不会产生微动磨损。而在三环减速器中,偏心套所承受转矩的大小和方向都会发生变化,情况就大不一样了。在三环减速器中,两根高速轴和三块传动环板构成三相并列双曲柄机构,偏心套起到曲柄作用,以其中一块环板为例对三环减速器进行受力分析可知,机构转矩随转角变化呈交替变化,在死点位置附近转矩出现两个极大值,正是这种交替变化使偏心套产生微动磨损,在运转过程中引起行星轴承发热、烧伤,偏心套与轴之间配合间隙增大,从而影响到整个减速器的性能。由于高速轴上不可避免地存在交变的转矩,从装配的角度分析,采用偏心套最容易安装,而偏心套不能同轴本身作为一体。尽管增大偏心套同轴颈的配合过盈量来使传递的转矩增加,当结合面间能传递的扭矩大于偏心套上承受的最大反向转矩时,可消除微动磨损,但这样将大大增加偏心套拆卸的难度,而且改变了联接的性质,使在实际使用中出现卡死现象,故在实际使用过程中往往采用小过盈配合。为了消除微动磨损,最好的办法是去掉偏心套,将两高速轴上的偏心套同轴本身作成一体,以消除微动磨损现象,彻底解决三环减速器的发热问题。与此类似,目前的两环、四环减速器因同样采用偏心套机构,均普遍存在发热和轴承早期磨损等亟待解决的问题。

#### 4 环式减速器改进设计

目前双环、三环及四环减速器的偏心轴颈是在轴上通过加偏心套方式来实现,轴和偏心套之间用键来连接,在运转过程中偏心套存在微动磨损,引起行星轴承发热、烧伤及偏心套与轴之间配合间隙增大,从而影响整个减速器的性能。为了消除这种微动磨损,唯一的办法是去掉偏心套,将两高速轴的偏心轴颈同轴作为一体,环式减速器因结构本身特点一直未能实现。改进的环式减速器正是在这一点上采用曲轴偏心方式来代替偏心套,不仅增大了两高速轴的直径,提高了高速轴的刚度,同时很好解决了目前环式减速器发热严重这一长期困扰环式减速器使用的难题,延长了减速器的使用寿命。

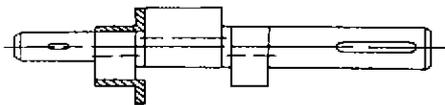


图6 带偏心曲颈的高速轴

对于三环减速器来说,两高速偏心曲柄轴结构简图如图6所示,高速曲轴的三个偏心是由两个具有偏心的曲拐和一个具有同等偏心量的曲拐加衬套构成,衬套与曲拐通过热装的方式加以连接后同另两个偏心曲拐一同进行磨屑加工,以便于控制三个偏心曲拐的偏心量。在加工工艺上采用两高速偏心曲轴作为一根曲轴加工,待加工好后再一分为二,以保证两根偏心曲轴偏心量具有同等的精度。对于两环减速器而言,高速曲轴的两个偏心是由两个具有偏心的曲拐构成,在加工工艺上同样采用两高速偏心曲轴作为一根曲轴加工,待加工好后再一分为二,以保证两根偏心曲轴偏心量具有同等的精度。两环减速器具有两相相位互成 $180^\circ$ 的并列双曲柄机构,在加工分度上比三环减速器具有三相相位互成 $120^\circ$ 的并列双曲柄机构更易保证,因而两环减速器比三环减速器在制造和安装方面更具有优势。

按上述方法设计并制造出了一台中心距为350 mm,传动比为28.5的三环式减速器,其基本设计参数为:内外齿轮的齿数 $z_1=57$ , $z_2=59$ ,变位系数 $x_1=0.6909$ , $x_2=1.10625$ ,模数 $m=7$  mm,齿形角 $\alpha=20^\circ$ ,齿顶高系数 $h^*=0.8$ ,偏心距 $a=8.68$  mm,齿轮啮合

角 $\alpha'=40.728^\circ$ ,齿轮材料用45CrNi2Mo。采用单电机输入,单电机功率 $p=44$  kW,输入转速 $n=960$  r/min。在连续运转5小时后,测量减速器油的温升,发现油的温升仍保持在 $50^\circ$ 左右,而对于改进前的减速器在同等工况下连续运转1小时,减速器油温升达 $70^\circ$ 。对于其它功率和传动比的环式减速器进行实验测试,可以得出同样的结论。表明上述改进措施,能很好地解决目前环式减速器的发热问题。

#### 5 结论

平行轴少齿差环式减速器——单环、双环、三环及四环减速器是我国提出的新型齿轮传动装置,分别获国家发明专利和实用新型专利。该传动装置与现有各种主要齿轮传动装置相比,具有结构简单、体积小、重量轻、传动比大、传动效率高、承载能力强等一系列优点,具有广泛的应用前景。但环式减速器在应用过程中出现的主要问题是高速( $n>1000$  r/min)重载情况下振动噪声大、温升高及轴承早期破坏等。在连续运转、重载、高速、大传动比工况下问题更为突出,大大影响了其推广进程,成为亟待解决的技术难题。本文在对环式减速器的基本结构型式和传动机理进行分析的基础上,对环式减速器的发热问题进行研究,探讨了引起环式减速器发热的主要原因,发现箱体轴承和环板高速轴承发热严重是主要热源,并进行了相应的实验验证。提出了解决发热问题的具体措施,该措施经实验验证很好地解决了环式减速器的发热问题,提高行星轴承及减速器的使用寿命,具有重要的工程实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 朱才朝、秦大同、韩西,等. 减少三环减速器振动的实验研究[J]. 农业机械学报,1999,30(4):66-70.
- [2] 应海燕、杨锡和. K-H型三环减速器的研究[J]. 机械传动,1992,16(4):37-43.
- [3] 朱才朝. 三环减速器振动控制的研究[D]. 重庆:重庆大学,1998.
- [4] 梁永生、李华敏、赵九江,等. 三环减速器变形协调条件的确定及其受力分析[J]. 机械设计,1999,(10):10-13.
- [5] 崔建昆、张光辉. 三环减速器偏心套微动磨损分析[J]. 机械设计,1986,(12):31-32.

(下转17页)

functions into square integrally wavelets of constant shape [J]. SIAM J. Math, 1984,15,723-736.

[5] MALLET S,HWANG W L. Singularity Detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transaction on information

theory ,1992,38(2):617-643.

[6] 谭善文,秦树人,汤宝平.小波分析突发故障中小波基的选择[J].振动、测试与诊断,2000,20(增刊):98-100.

## Time-frequency Characteristic of Wavelet Base and Its Application Transient Signal Detection

TAN Shan-wen , QIN Shu-ren , TANG Bao-ping  
(Test Center of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The application of wavelet analysis in fault diagnosis is growing rapidly. There are many different wavelet base to use but no accepted procedure for choosing among them, the analysis results by using them have great difference. This paper describes the significant properties of wavelet base, and analysis behavior of transient signal in wavelet transform, result on some methods for how to choose wavelet base in analysis transient signal.

**Key words:** wavelet transform; characteristic of time-frequency; fault diagnosis

(责任编辑 成孝义)

\* \* \* \* \*

(上接 8 页)

## Study on Heating of Ring Reducer

ZHU Cai-chao , QIN Da-tong , RAN Zhen-ya , SUN Shi-ya  
(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The single-ring, double-ring, three-ring and four-ring reducers are new kind of gear drive developed in the past decade. Adopting the new conception of "parallel and movable axis" of multiple mechanisms, this kind of gear drive has many characteristic such as simplicity and compactness in structure, large transmission ratio, high efficiency and so on. As the three-ring reducer has been invented only for ten years, up to now the design of the gear drive is only made with analogue method, no design theory can be followed, there exist serious vibration and noise in transmission, which limit its wide application in industry. On the base of the principle of transmission and basic configuration of single-ring, double-ring, three-ring and four-ring reducer, the problem about heating of ring reducer and the primary reason and the part which result in heating are discussed. Moreover, the result is tested through the corresponding experiment and the concrete measure about resolving the heating problem is put forward. It is proved that the measure can commendably resolve heating of ring reducer and extend the using life of epicyclic bearing and the ring reducer. So it has important theoretic sense and engineering practical value.

**Key words:** reducers; principle of transmission; heat

(责任编辑 成孝义)