

# 波长三次重用的多波长星形光网络及其性能分析

甘朝钦

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**[摘要]** 通过引入分布式结构+反馈回路+波长分组的方法,提出了一种新的波长三次重用的多波长星形光网络。这种新的网络通过多耦合器内连和网络所有信道波长的三次重用,使网络规模和网络最大吞吐量都达到常规WDM星形网的4倍;通过单纤双向传输,在网络节点数相同的条件下,可节省光纤50%;通过采用分布式结构,使网络的抗毁性得到大幅度提高。

**[关键词]** 波分复用;波长重用;可调多波长选择路由器;分布式结构;反馈回路;波长分组

**[中图分类号]** TN29 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)10-0084-06

## 1 引言

波分复用(WDM)星形网以其传输损耗小、对光接收机动态范围要求低等优越特性将成为下一代WDM光网络的主流结构之一<sup>[1~4]</sup>。当前,常规WDM星形网已得到广泛应用,这种WDM星形网主要由对称传输型星形耦合器构成,见图1。

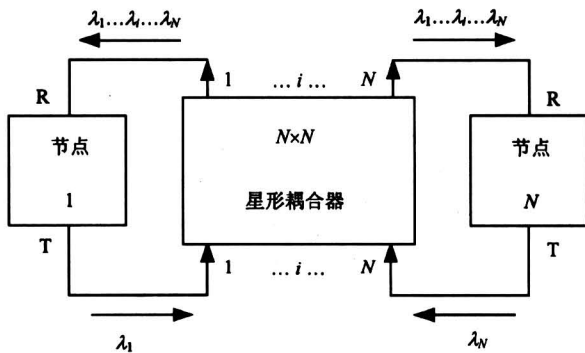


图1 常规WDM星形网拓扑结构

Fig.1 Topologic structure of conventional WDM star network

网络中,每个节点通过两根光纤与中心星形耦合器的一对端口相连,一根光纤传输该节点需要发送的信息,另一根光纤传输送往该节点的信息;对

于规模为 $N \times N$ 的中心传输型星形耦合器,网络可支持的节点数为 $N$ ;由于传输型星形耦合器分配损耗的限制,星形耦合器的规模 $N$ 不能太大。又因网络的单跳特性,网络中的一个信道波长同一时刻只能供一个节点使用,而网络中实际可供利用的信道波长是十分有限的,所以,常规WDM星形网的网络规模受到星形耦合器所能提供的有限端口数和可供利用的有限信道波长数双重限制<sup>[1,4]</sup>,使得它无法支持大量的节点。此外,由于采用集中式结构,网络的抗毁性能较差;又因每个节点与中心星形耦合器相连要用两根光纤,网络所使用的光纤也太长;所有这些网络性能缺陷的存在,使得常规WDM星形网难于适应未来超大容量WDM光网络的需求。

针对以上问题,通过引入分布式结构+反馈回路+波长分组的综合解决方案,提出了一种新的波长三次重用的多波长星形光网络。使用该方法,在不对星形耦合器提出更高要求的情况下,充分利用反馈回路的反馈特性和传输型星形耦合器的传输特性,不仅使得新网络所支持的最大节点数达到常规WDM星形网的4倍,而且在网络规模相同条件下,可节省光纤50%。网络中所有数据信道波长都可实现三次重用,在可供利用的信道波长数一定

时，网络的最大吞吐量达到常规 WDM 星形网的 4 倍。网络采用分布式结构，网络的抗毁性能得到大幅度提高。

### 2 波长三次重用的多波长星形光网络结构

波长三次重用的多波长星形光网络结构如图 2 所示，它主要由 4 个  $N \times 6$  耦合器、4 个可调多波长选择路由器 (TWR)<sup>[2, 5-7]</sup>、4 个宽带光放大器 (OA)<sup>[8]</sup>、1 个控制模块和  $4N$  个节点等连接构成。每个  $N \times 6$  耦合器提供一边的 6 个端口用于各器件之间的相互连接、构成反馈回路以及与控制模块相连。另一边的  $N$  个端口用于连接节点，每个端口通过 1 根光纤连接 1 个节点，共可连接  $N$  个节点。所以，整个网络所支持的节点数为  $4N$ ，即网络所支持的节点数达到常规 WDM 星形网的 4 倍。对于

每个节点，配置 1 个数据信道专用全频可调收发机和 1 个控制信道专用固定波长收发机<sup>[9, 10]</sup>。每个节点发送数据时，其发射机调整的波长以及接收数据的接收机采用的波长均由控制系统决定。图 2 中有 4 个反馈回路，反馈回路 1 的作用使得与耦合器 1# 直接相连的  $N$  个节点之间的通信成为可能，即实现网络的单纤双向传输。其他 3 个反馈回路有类似的作用。考虑到每个通信信道波长都要 2 次通过  $N \times 6$  耦合器而带来更大的功率损耗、TWR 的插入损耗以及线路中的其他功率损耗的存在，因而在链路中加入了光放大器进行功率补偿。网络中有 4 个  $1 \times 4$  型 TWR，每个 TWR 都有 1 个控制接口、1 个输入端和 4 个输出端 (1, 2, 3, 4)；每个 TWR 的控制接口都分别与控制模块直接相连。 $1 \times 4$  型 TWR 的工作原理<sup>[5]</sup>：根据控制系统的控制指令， $1 \times 4$  型 TWR 将通过它的所有数据信道波

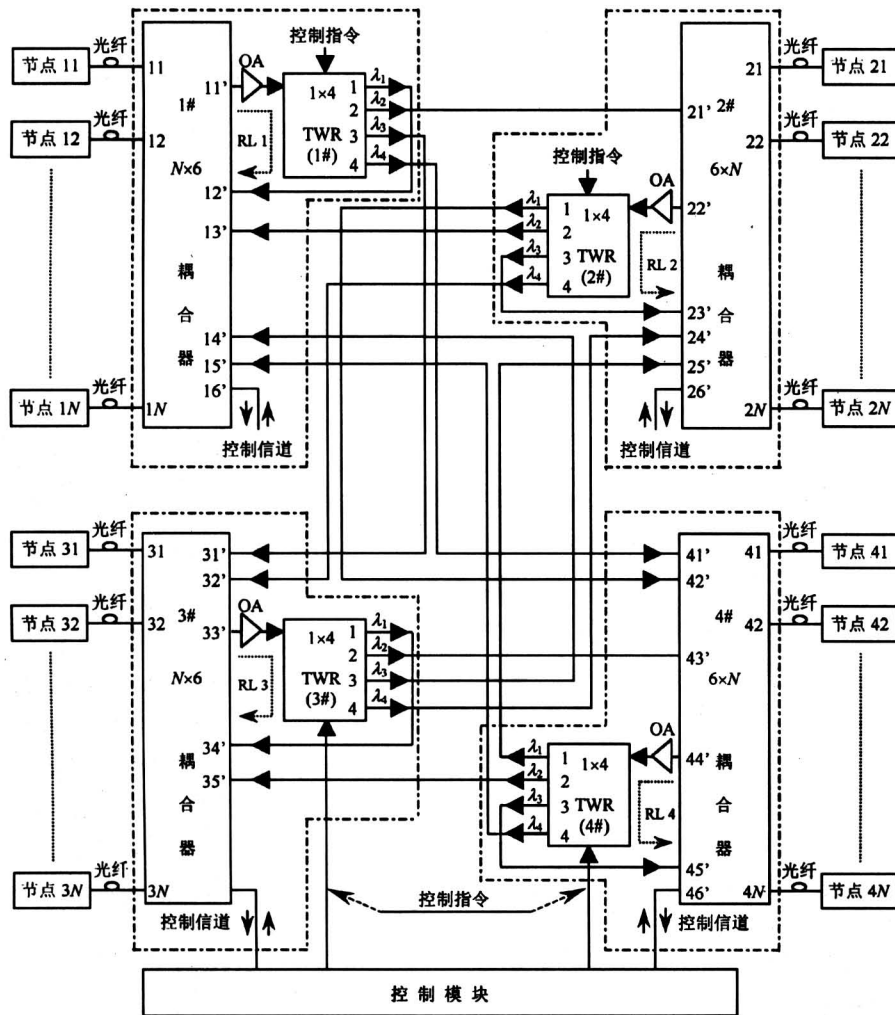


图 2 波长三次重用的多波长星形光网络结构

Fig.2 Structure of multi-wavelength star optical network reusing all channel wavelengths three times

长分成 4 个波长组 ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ), 且分别从相应的 4 个输出端口 (1, 2, 3, 4) 输出, 每个输出端口输出波长的波长数及其波长分布由控制系统根据网络的通信情况决定。每个  $N \times 6$  耦合器都将其一边 6 个端口中的一个端口与控制模块相连, 用于各节点通过专用控制信道向控制系统发出通信请求和控制系统向各通信节点发送控制指令。控制系统根据网络中各节点的通信请求, 将整个网络的数据信道波长分成 4 个波长组 ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ), 发出同步指令, 使得各 TWR 作出相应的参数设置且同步运行。同时, 网络中各通信节点通过各自的控制信道接收机接收到来自控制系统的控制指令, 亦同步地将各自的数据信道全频可调收发机调至相应指定的波长进行通信。由网络系统结构可知, 同一时刻不可能有 2 个完全相同的数据信道波长到达同一个节点的接收机, 因而不会引起通信冲突。

从图 2 可见, 网络中心部分的 4 个  $N \times 6$  耦合器通过连接构成了具有分布式结构特点的内连型  $4N \times 4N$  双向星形耦合器, 该网络是一个具有分布式结构特点的波长重用双向多波长星形光网络。

为了提高网络的抗毁性能, 将网络中  $4N$  个节点分成 4 组, 每组  $N$  个节点, 令与耦合器 1# 直接相连的  $N$  个节点为第 1 组节点。同理有第 2、第 3、第 4 组节点。在每个节点区的  $N$  个节点中选定 1 个节点为主节点, 每个主节点都具有对网络系统进行控制管理的能力, 给 4 个网络不同节点区的主节点设定不同的优先级。网络运行中, 网络控制系统的控制管理信息都将映射给每个主节点。通信中一旦网络控制系统出现问题, 4 个主节点中优先级最高的主节点将自动承担起对整个网络的控制管理职责。若此时优先级最高的主节点也出了问题, 则优先级次之的主节点将自动承担起对整个网络的控制管理职责, 依次类推。从图 2 的网络系统结构可知, 每个节点区既相互联系, 又具有相对独立性, 每个节点区都可以独立成网。通信中, 若某个  $N \times 6$  耦合器出现问题, 只影响该  $N \times 6$  耦合器所处节点区各节点之间以及该节点区与其他节点区的通信, 对网络其他部分的通信无影响, 即一个  $N \times 6$  耦合器出问题只影响网络四分之一节点的通信。由此可见, 具有分布式结构特点的波长重用多波长星形光网络的抗毁性能要比常规 WDM 星形网强的多。实际应用中, 每个节点区所连接的节点数可根据需要灵活调节, 不必完全相同。

### 3 网络的波长重用特性

网络中, 配置一个控制信道专用波长  $\lambda_K$ , 每个通信节点向控制系统发出通信请求和控制系统向通信节点发送控制指令都使用这个波长。设网络可使用的数据信道波长数为  $m$ , 由前者可知,  $m$  个数据信道波长又分为 4 个波长组 ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ), 每个波长组中的波长数及其波长分布由控制系统根据网络中各节点的通信请求情况决定。由于网络中各节点间的通信是动态变化的, 所以每个波长组中的波长数及波长分布也是动态变化的。图 3 是网络波长重用和节点分组的示意图。

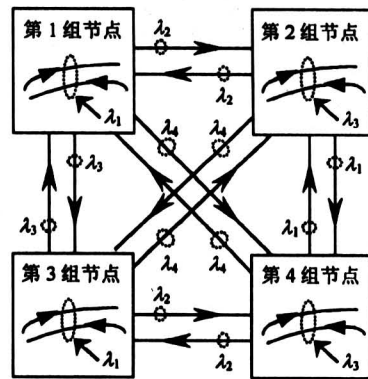


图 3 波长重用与节点分组示意图  
Fig.3 Scheme of wavelength reuse and node groups

图 3 中第 1 组节点与第 2 组节点之间的通信使用  $\lambda_2$  波长组, 即当第 1 节点组中的节点向第 2 节点组中的节点发送数据时, 使用  $\lambda_2$  波长组, 欲发送数据的各节点相互竞争  $\lambda_2$  组波长中各波长的使用权, 以便发送各自的数据。同样地, 第 2 节点组中的节点向第 1 节点组中的节点发送数据也使用  $\lambda_2$  波长组, 欲发送数据的各节点同样相互竞争  $\lambda_2$  组波长中各波长的使用权, 用于发送各自的数据。同时, 第 3 组节点与第 4 组节点之间的通信也使用  $\lambda_2$  波长组, 各节点间的通信也存在类似的竞争。同理, 第 1 组节点与第 4 组节点之间的通信和第 2 组节点与第 3 组节点之间的通信可同时使用  $\lambda_4$  波长组, 第 1 组节点与第 3 组节点之间的通信使用  $\lambda_3$  波长组, 第 2 组节点与第 4 组节点之间的通信使用  $\lambda_1$  波长组, 第 1 组节点内部各节点之间和第 3 组节点内部各节点之间的通信同时使用  $\lambda_1$  波长组, 第 2 组节点内部各节点之间和第 4 组节点内部

各节点之间的通信同时使用  $\lambda_3$  波长组, 欲通信的各节点对数据信道波长使用权的竞争也和上面相似。由此可见, 4 个波长组 ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ) 中的每个波长可同时用于 4 个节点发送数据, 即每个波长均被重用 3 次; 如此, 网络最大吞吐量达到常规 WDM 星形网的 4 倍。

#### 4 网络所支持的最大节点数

网络中, 由于每个节点仅通过一根光纤与耦合器的一个端口相连, 为了将节点发射机的输出光信号耦合到光纤中传给  $N \times 6$  耦合器以及将来自  $N \times 6$  耦合器的光信号耦合到节点的接收机中, 同时也使发射机和接收机之间得到良好的隔离, 需要在每个节点处增加一个 Y 形耦合器<sup>[1,7]</sup>。设 Y 形耦合器的附加损耗为  $L_{0X}$ ,  $N \times 6$  耦合器的附加损耗为  $L_{1X}$ , 各可调波长路由器有相同的插入损耗  $L_2$ , 网络中具有最大光纤长度的两节点间光纤损耗为  $L_F$ , 节点发射机的输出功率为  $P_T$ , 节点接收机的灵敏度为  $P_R$ , 宽带光放大器的饱和增益为  $G_{sat}$ , 网络系统的冗余度为  $L_M$ , 网络所支持的最大节点数为  $N_{node-max}$ 。所有损耗均以百分损耗计。若 2 通信节点之间的距离取网络中 2 节点间距离的最大值, 则根据图 2 所示网络系统结构的对称性, 可推得网络所能支持的最大节点数 ( $N_{node-max}$ ) 为

$$N_{node-max} = 2(1 - L_{0X})(1 - L_{1X}) \cdot \left[ \frac{G_{sat} P_T (1 - L_2)(1 - L_F)(1 - L_M)}{P_R} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式 (1) 结论是根据网络中相距最远的 2 节点得出的, 即只考虑了传输损耗最大的情况; 一般情况下, 网络所支持的节点数要比上述计算结果大一些。图 4 给出了当  $L_{0X} = 0.1$  dB,  $L_{1X} = 1$  dB,  $L_2 = 3.5$  dB,  $L_F = 2$  dB,  $L_M = 3$  dB,  $P_R = 10^{-3}$  mW,  $P_T = 1$  mW 时, 网络所能支持的最大节点数  $N_{node-max}$  与光放大器饱和增益  $G_{sat}$  的关系曲线。

从图 4 中曲线可见, 在通常条件下, 若光放大器饱和增益  $G_{sat} = 25$  dB, 网络所支持的最大节点数为 328 个; 若光放大器饱和增益  $G_{sat} = 30$  dB, 网络所支持的最大节点数达到 582 个; 若光放大器饱和增益  $G_{sat} = 35$  dB, 网络所支持的最大节点数高达 1 036 个。显然, 要达到如此高的网络容量, 在星形耦合器端口数和网络信道波长数有限条件下, 常规 WDM 星形网无法满足要求。但采用图 2

所示的网络系统结构, 却能顺利组网。

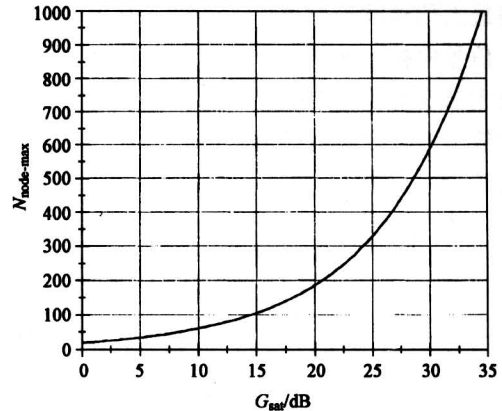


图 4 网络最大节点数与光放大器饱和增益的关系

Fig.4 Relative curve of the maximum number of network's nodes and the saturation gain of optical amplifier

#### 5 网络最大信道波长数

设网络中可利用的最大信道波长数为  $m_{max}$ , 光放大器的饱和输出功率为  $P_{sat}$ 。则根据图 2 所示网络系统结构, 可推得网络最大信道波长数  $m_{max}$  为

$$m_{max} = \frac{P_{sat}(1 - L_{0X})(1 - L_{1X})}{2} \cdot \frac{(1 - L_2)(1 - L_F)^{1/2}(1 - L_M)}{NP_R} \quad (2)$$

各参数取值同上。由式 (2) 可知, 网络最大信道波长数  $m_{max}$  是光放大器饱和输出功率  $P_{sat}$  和星形耦合器规模  $N$  的函数。图 5 给出了星形耦合器规模  $N$  分别为 8, 16, 32, 64, 128 时, 网络最大信道波长数与光放大器饱和输出功率的关系曲线。

图 5 中曲线表明, 当  $N$  一定时, 网络最大信道波长数随光放大器饱和输出功率的增加而增加, 对应于较大的  $N$  值, 增加的幅度将减小。因为,  $N$  一定, 意味着网络单波长传输损耗不变。所以, 当光放大器饱和输出功率增加, 即光放大器补偿能力增强时, 就可放大更多的波长, 换句话说, 网络的最大信道波长数增加。当  $N$  值较大时, 网络单波长传输损耗也相应较大, 这部分损耗要由光放大器进行补偿, 网络最大信道波长数增加的幅度相应要减小。

以上从功率预算角度对网络所支持的节点数和网络最大信道波长数进行了计算。在 WDM 光网络中, 信号串扰、噪声和色散积累、非线性效应以及光放大器带宽等都对光网络所支持的节点数和网络最大信道波长数有重要的影响, 对此, 笔者将以另文专题论述。

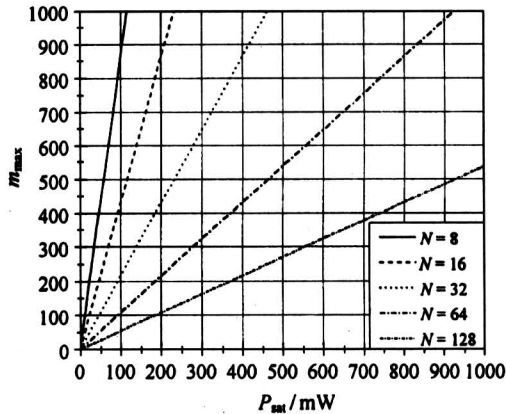


图5  $N$ 一定时, 网络最大信道波长数与光放大器饱和输出功率的关系

Fig.5 Under the condition that  $N$  is constant, the relations of the maximum number of network's nodes and the saturated output power of optical amplifier

## 6 结论

针对常规 WDM 星形网存在的问题, 通过引入分布式结构 + 反馈回路 + 波长分组的方法, 提出了一种新的波长三次重用的多波长星形光网络。该网络的优点:

1) 通过多耦合器内连, 在耦合器规模相同的条件下, 网络所连接的节点数达到常规 WDM 星形网的 4 倍; 在网络节点数相同的条件下, 可大大降低耦合器规模, 从而减小耦合器分配损耗, 进而降低网络对节点收发机的性能要求, 降低网络成本。

2) 通过单纤双向传输, 在网络节点数相同的条件下, 可节省光纤 50%; 在网络耦合器所提供连接节点的端口数相同的条件下, 可使网络规模扩大 1 倍。

3) 网络中所有数据信道波长都可实现三次重用, 在可供利用的信道波长数一定时, 网络的最大吞吐量达到常规 WDM 星形网的 4 倍; 在网络规模

相同的条件下, 可大大减少网络节点的排队时延, 缓解各通信节点之间对数据信道波长使用权的竞争冲突, 有效地改善网络性能。

4) 通过采用分布式结构, 大大增强了网络的抗毁性, 某个  $N \times 6$  耦合器出问题只影响网络四分之一节点的通信。

该网络组网方案具有一定的实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 原 荣. 光纤通信网络 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1999. 231~299
- [2] Elmighani J M H, Mouftah H T. Technologies and architectures for scalable dynamic dense WDM networks [J]. IEEE Commun Mag, 2000, 38(2): 58~66
- [3] Senior J M, Handley M R, Leeson M S. Developments in wavelength division multiple access networking [J]. IEEE Commun Mag, 1998, 36(12): 28~36
- [4] Brackett C A. Foreword is there an emerging consensus on WDM networking? [J]. IEEE J Lightwave Tech, 1996, 14(6): 936~941
- [5] Gan Chaoqin, Sun Xiaohan, Zhang Mingde. A new  $1 \times K$  tunable multi-wavelength router and its features [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, B11(1): 61~65
- [6] Smith D A, Chakravarthy R S, Bao Z, et al. Evolution of the acoustic-optic wavelength routing switch [J]. IEEE/OSA J Lightwave Tech, 1996, 14(6): 1005~1019
- [7] Feldman R D, Harstead E E, Jiang S, et al. An evaluation of architectures incorporating wavelength division multiplexing for broad-band fiber access [J]. IEEE / OSA J Lightwave Tech, 1998, 16(9): 1546~1559
- [8] Freeman P, Ratoff D, Mehuys D, et al. High capacity EDFA with output power to support densely loaded channels [A]. Proc OFC'99, paper WA6. [C]. 1999, 16~18
- [9] Zirngibl M. Multifrequency lasers and applications in WDM networks [J]. IEEE Commun Mag, 1998, 36(12): 39~41
- [10] Tong F. Multiwavelength receivers for WDM systems [J]. IEEE Commun Mag, 1998, 36(12): 42~49

## A Multi-wavelength Star Optical Network Reusing All Channel Wavelengths Three Times and Its Features

Gan Chaoqin

(*Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

**[Abstract]** In this paper, a novel multi-wavelength star optical network reusing all channel wavelengths three times is proposed by the method of "(Distributed Architecture) + (Return Link) + (Wavelength Group)". In this scheme, by interconnecting four conventional star couplers and reusing all channel wavelengths three times, both the maximum number of supportable nodes and the maximum throughput of the network are all up to four times as many as that of conventional WDM star network. Utilizing bidirectional transmissions in a single fiber, half fibers can be saved under the same number of supportable nodes. Making use of the distributed architecture, the anti-destructibility of network is drastically raised. All these advantages of the network efficiently overcome the disadvantages of conventional WDM star network.

**[Key words]** wavelength division multiplexing; wavelength reuse; tunable wavelength router for multi-wavelength selection; distributed architecture; return link; wavelength group

(上接第 51 页)

[14] 李自军, 洪迈生, 魏元雷, 等. 基于主轴回转运动误差在线检测的二次相移三点法 [J]. 光学精密工程, 2001, 9 (4): 319~323

[15] 李自军, 洪迈生, 苏恒, 等. 基于二次相移数据重组的直行运动误差在线检测分离技术 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9 (4): 360~365

## Virtual-position Reading Method—a Novel Method for Error Motion and Form Error Separation

Hong Maisheng<sup>1</sup>, Li Zijun<sup>1</sup>, Su Heng<sup>1</sup>, Ye Feifan<sup>2</sup>

(1. *School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*;

2. *School of Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China*)

**[Abstract]** On the basis of signal re-organization, a novel method named virtual-position reading method is proposed in this paper. By means of this method, form error or error motion can be respectively separated according to practical needs, and the separating sequence of form error or error motion can also be optional. Furthermore, in the proposed method, it is not necessary to change the conventional measuring and separating system of form error or the normal procedures of separating operation. It is proved that the new method is flexible and convenient in use.

**[Key words]** virtual-position reading; signal re-organization; form error; error motion; error separation techniques