

文章编号: 1002-2082(2006) 06-0485-06

自由曲面光学虚拟制造与检测系统的探讨

杜雪, 王尔祺, 李荣彬, 张志辉

(香港理工大学 工业及系统工程学系先进光学制造中心, 香港 九龙)

摘要: 自由曲面光学产品设计、制造与检测的工艺流程,通常采取试凑法逐次逼近。由于加工—检测—再加工,循环往复,既费时,成本又高,产生了瓶颈问题。为了解决此弊端,本文运用虚拟制造技术,提出光学虚拟制造的基本构想,即虚拟制造系统结构模型,给出光学系统虚拟原型的构成和光学系统成像质量虚拟检测系统的构成,讨论光学成像质量的仿真检测以及敏度分析方法。研究表明:运用虚拟制造与检测技术,可缩短研发周期,降低成本,优化工艺并提高产品质量。

关键词: 光学技术与仪器;自由曲面光学;虚拟制造技术;像质仿真检测

中图分类号: TH74

文献标志码: A

Investigation into virtual manufacturing procedure for freeform optics

S. TO, Er-qi WANG, W. B. LEE, C. F. CHEUNG

(Advance Optics Manufacturing Centre, Department of the Industrial and System Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract Successive approximation method is adopted in the design, manufacture, and test of freeform optics. This approach requires repeated trial-and-error processes before a satisfactory result is achieved. Such repetitions are not only expensive, but also time consuming, and it becomes a bottle-neck in the overall process flow. The virtual technology is an effective and fast way to solve this problem. An investigation into a virtual manufacturing and testing procedure (VM TP) for freeform optics is presented in this paper. The essential concepts about VM TP for optics ultra-precision machining (UPM) are put forward, including the construction of a VM TP model, the prototype structure of an optical system, and the virtual testing and sensitivity analysis of the imaging quality. The investigation indicates that this approach can accelerate the R&D process, reduce the cost, enhance the manufacturability and improve the product quality.

Key words optical technology & instruments; freeform optics; virtual manufacturing; image virtual testing & simulation

引言

自由曲面光学元件是根据现代光电信息系统对信息发送、接收和传递功能的特殊需要,突破传统光学成像的概念,随意构造的奇异光学元件。这种光学元件用传统制造方法是难以完成的,只能建

立在超精密先进光学制造技术的基础上,利用金刚石单刃车、铣及磨削等超精密加工工艺,获得亚微米量级形状精度和纳米量级粗糙度的光学镜面。因此,这种新的工艺技术,可用于直接加工自由曲面光学元件及其注塑模芯,大批量生产塑料光学元

收稿日期: 2006-05-16; 修回日期: 2006-06-20

作者简介: 杜雪,女,英国布尼尔大学硕士,香港理工大学博士,助理教授,长期从事超精密加工技术及精密注塑技术与材料科学研究

件,从而为市场提供价格低廉的精密光学、电子产品。由于超精密光学加工是一种技术水平要求非常高的复杂工艺技术,通常需要经过:加工↔检测↔再加工……循环往复数次才能完成,既费时,成本又昂贵,这成为整个流程中的瓶颈。虚拟制造技术的运用,是拓宽该瓶颈的有效途径。

虚拟制造(VM)是20世纪90年代发展起来的一门新技术,通过计算机对新产品的设计与制造过程进行模拟和仿真,使设计者可以在计算机上“制造产品”。这不仅可以提高新产品的设计与制造质量,还可预测和控制产品的成本与质量,并缩短开发周期,增强企业在全球化市场的竞争力。该技术虽已得到广泛应用,但在光学超精密制造工程上正处于发展研究应用阶段。文献[1-3]对光学超精密虚拟制造系统的研究作了报导,推动了光学产品虚拟制造技术的发展。

本文拟对自由曲面光学产品的设计、制造与检测的计算机仿真进行探讨,从光学系统的特点入手,讨论自由曲面光学虚拟超精密制造与检测的基本构想。

1 传统制造流程及其存在问题

光学产品设计、超精密加工与检测流程如图1

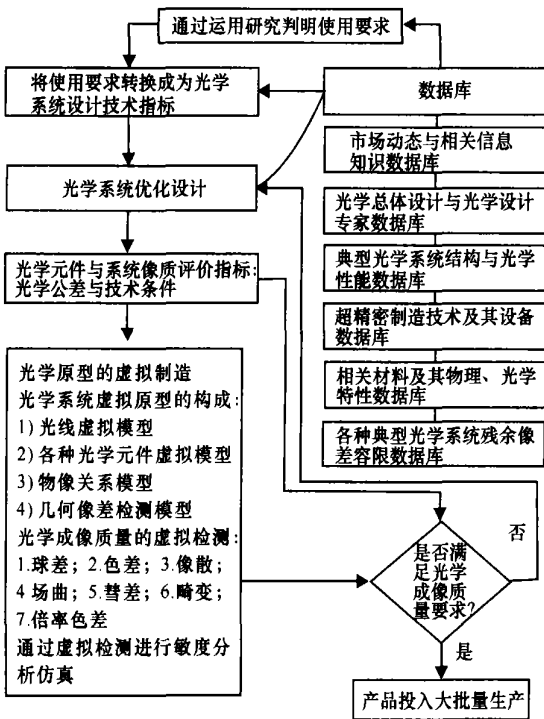


图1 自由曲面光学原型虚拟制造与检测流程图
Fig. 1 Virtual manufacture and test procedure for prototype freeform optics

所示。从“运用研究”开始,将使用要求转换成光学设计的技术性能指标→进行光学系统的优化设计,给出光学设计结果↔原型试制↔检测↔修改与完善设计→投入大批量生产。现就主要的几个问题进行讨论。

1.1 运用研究

在光学产品研发中,怎样才能满足用户提出的使用要求?目前,大多是凭经验进行分析和判断,以协调需要与可能之矛盾。其主要的缺点是缺乏可靠的评价标准,所确定的设计技术性能指标难以达到组合匹配的优化,由此导致产品开发失败的事也偶有发生。

为了利用计算机辅助“运用研究”,首先应当按照系统学和息论的观点,将系统中参与产品设计和制造的各个环节进行分类、综合与分析研究,建立相应的数据库,如图1所示。这是一项难度和工作量相当大的数字化的研究工作,此前已有人在光学设计的数据库方面做了大量工作,并且在不断充实中。香港理工大学先进光学制造中心在发展超精密金刚石单刃车削制造技术与超精密光学测量技术方面,为建立光学数据库打下了实验基础。根据超精密光学制造的应用范围和发展前景,在建立数据库时,可将典型的光学系统大致分为下列8类:

- 1) 自由曲面光学系统;
- 2) V槽阵列光学系统;
- 3) 二元光学系统;
- 4) 衍光光学系统;
- 5) 微透镜阵列光学系统;
- 6) 显微光学系统;
- 7) 望远光学系统;
- 8) 照相光学系统。

从大量的先进光学技术文献与数据中,可以筛选整理出每一类典型的光学系统结构形式及其光学性能数据,以供发展研究与设计制造应用。数据库建立后,可根据使用要求与光学系统性能指标、材料的光学物理特性等方面的某种因果或制约关系构成目标函数,以各种可能的技术条件作为约束,利用优化算法来探讨寻优问题。由于使用要求大多是多目标函数,甚至有的目标之间存在相互制约关系,如望远光学系统的设计技术性能指标中,大倍率与大视场的要求是相互制约的,不进行协调难以实现。因此,在探讨利用计算机辅助运用研究时,同样必须深入研究这个物理工程的内在规律,或者采取主目标函数法,或者采取加权求和法,建

立评价函数来探讨寻优问题,使所设计产品的光学设计参数与光学性能指标的组合匹配达到相对的优化解,使“运用研究”逐步走上数码化设计的轨道

1.2 光学系统的优化设计

光学系统优化设计是近 50 年来随着计算机与计算技术的发展而迅速发展起来的,相继出现了不少软件包。利用光学设计专用软件进行光学设计时,设计者应先给出光学系统结构形式,受控制的像差个数、像差的目标值(即像差的公差容限)以及评价函数中的人工权因子。然后,计算机将按照一定的程序,自动改变透镜的曲率半径、间隔或厚度,甚至调整材料的折射率,即进行像差自动校正和像差自动平衡。经过这样的 CAD 流程之后,最终获得像质优良的光学系统及其结构参数的最优组合,并给出光学公差及像质评价。

1.3 光学原型的试制、检测及修改与完善设计

原型试制一般采用下述 2 种方法之一:一是采用金刚石单刃车、铣及磨削等超精密制造技术,直接加工光学元件的原型;二是经超精密加工注塑模具之后,再注塑光学元件,获取原型(样品)。

无论用那一种方法制造的光学元件原型,经检验合格之后,须进行装配再作系统的成像质量检验与性能测试。检测结果如果发现光学系统样品成像质量不合格,则必须修改设计或修改模具,重新制造样品,再检验。这个过程实际上是根据实测数据(凭经验),采用了逐次逼近试凑法(trial-and-error method)。通常,加工↔检测↔再加工……如此循环,需要反复数次才能完成,既费时,成本又高,它成为整个超精密光学制造流程的瓶颈。运用下述虚拟制造技术是拓宽该瓶颈唯一有效而又快速的途径^[1]。

2 光学原型的虚拟制造研究

2.1 虚拟制造系统的结构模型

自由曲面光学超精密加工的虚拟制造体系结构模型^[1]如图 2 所示。由以下 2 个功能层和 2 个用户接口构成:

● 建模层——创建设备模型库、工件模型库和过程模型库,为虚拟制造和虚拟检测提供所需模型和信息。

● 仿真层——根据设备模型、工件模型、NC 程序、光学优化设计程序、成像质量检测程序等进行制造过程和检测过程的仿真,通过检测过程的敏度

分析仿真,可实时预测各组成环节的误差对光学系统像质的影响程度。

● 建模界面——用户通过该界面可以实现制造和检测系统与建模的交互。当现实制造设备和工程活动发生改变时,相应的模型也应及时更新。

● 仿真用户界面——用户可通过该界面从建模层的各模型库中取得所需模型,建立虚拟制造环境,交互控制设备、制造过程以及检测过程。

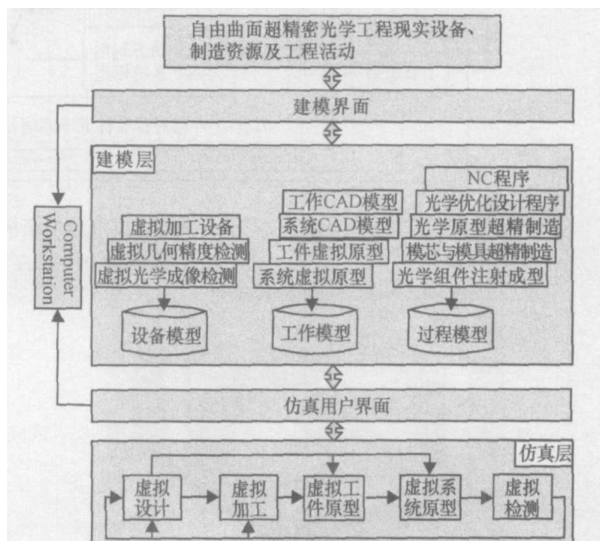


图 2 自由曲面光学超精密工程虚拟制造系统结构模型

Fig. 2 VM system structure model for freeform optics UPM engineering

2.2 光学系统虚拟原型的构成

2.2.1 虚拟工件

虚拟工件模型是仿真(实际加工)工件的几何模型和材料属性等的信息载体。

虚拟加工模块(VMM)根据光学设计参数和加工机床的特性数据,仿真刀具轨迹和工件表面形貌。同时,亦可进行加工参数的优化选择和机床加工性能的评价。其功能结构如图 3 所示。有 2 个子系统:

1) 刀具-工件相对位置计算子系统。根据所执行的数控指令、机床的运动误差模型和动态误差模型以及切削系统动态模型,计算出某时刻刀具相对于工件的位移。运动模型仿真超精密机床的数控系统,先对数控指令进行翻译,执行相应的插补功能后,输出机床各运动轴在某时刻应处的空间相对位置。

2) 加工仿真子系统。实现虚拟机床的功能,仿真材料去除过程(如图 4 所示),生成虚拟工件。虚拟工件模型由 2 个最基本的子模型——几何(形状)子模型和误差子模型组成。

几何子模型包含工件的几何(形状)信息,即工件在理想加工条件下生成的几何模型,仅与 NC 程序和刀具切削刃的几何形状有关,其误差仅仅反映

NC程序的编程误差 虚拟加工开始之后,随着 NC 指令的逐条执行,虚拟工件的几何子模型也逐步修改、更新,以仿真切削过程。

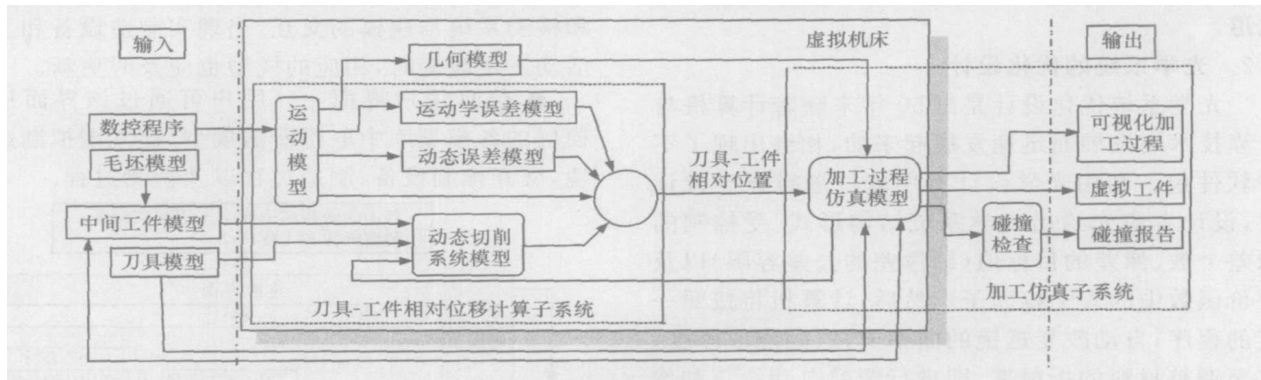


图 3 虚拟加工模块 (VMM) 的功能结构

Fig. 3 Function structure of virtual machining module

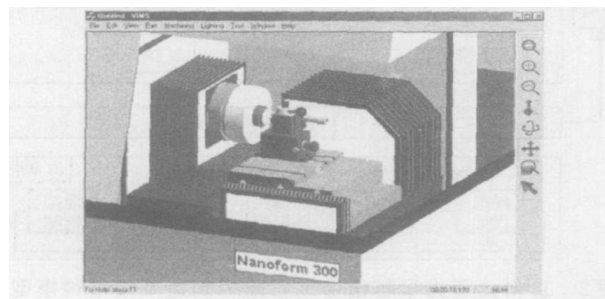


图 4 仿真切削过程 3-D 模型

Fig. 4 3-D model for simulation turning process

误差子模型包含误差数据,即根据刀具的运动轨迹,记录了加工误差数据。同时,根据误差模型计算各单项误差及其误差变换,经向量迭加后存入误差子模型中。

综上所述,虚拟加工过程结束后,所生成的虚拟工件包含了工件的几何信息和误差信息。由此构成的光学元件虚拟原型,为加工精度的预测和误差分析与补偿提供了完整的信息。

2.2.2 虚拟工件的检测

虚拟检测模块 (VIM) 的功能结构如图 5 所示。

通过对虚拟工件表面形貌的仿真来确定已加工表面的粗糙度和形状误差。首先,根据虚拟工件提供的仿真数据,建立虚拟表面形貌;然后根据模型仿真测量机的工作原理,完成形状和表面粗糙度的虚拟测量(如图 6 所示),输出修正的表面轮廓。应用不同粗糙度波度的滤波和采样长度,可以预测和仿真表面粗糙度轮廓和波度,并且根据修正表面轮廓可以确定形状误差或进行刀具路径补偿。

残余形状误差补偿流程如图 7 所示。首先由刀具路径编程器,TPG(tool path generator)产生数控

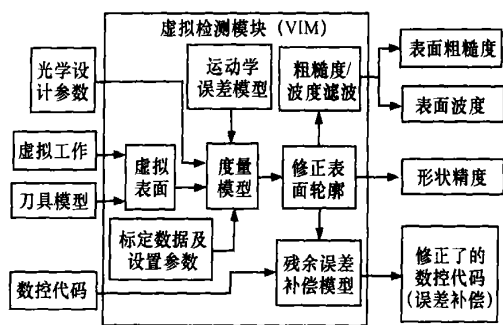


图 5 虚拟检测模块 (VIM) 功能结构图

Fig. 5 Function structure of virtual inspection module

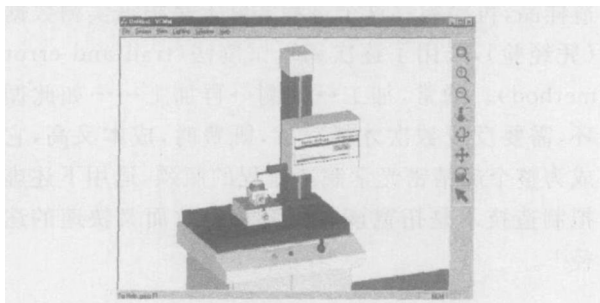


图 6 虚拟检测 3-D 模型

Fig. 6 3-D model for virtual inspection procedure

程序,输入 VMM 进行虚拟加工。VIM 根据 VMM 生成虚拟工件的仿真测量过程,输出预测的已加工表面形状精度和仿真的修正表面轮廓。如果预测的已加工表面形状精度满足精度要求,则结束刀具路径补偿过程;否则,对原数控程序进行点对点的刀具路径补偿,进入新一轮虚拟加工、虚拟检测。刀具路径补偿循环,直至预测的已加工表面形状精度满足要求。在刀具路径补偿实验中,第一轮刀具路径补偿减少残余形状误差 86.4%,并且表面粗糙度从

8.4 nm减少到 7.8 nm^[5]。

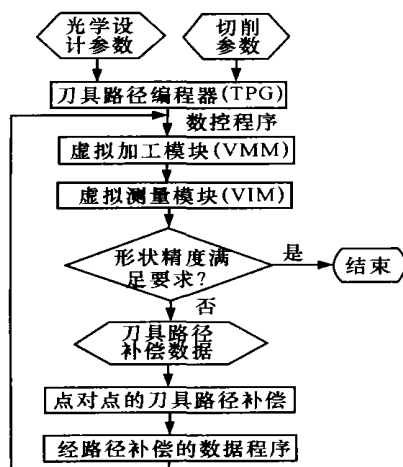


图 7 形状误差补偿流程

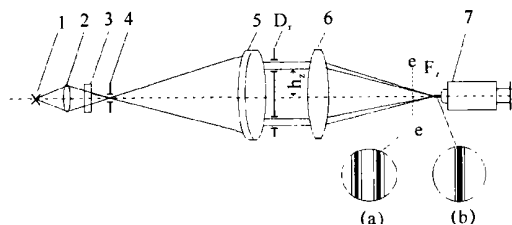
Fig. 7 Flow chart of shape error compensation

虚拟制造经过加工与检测 2 个流程及其循环之后,可获得合格的虚拟工件“成品”。作为光学元件及其系统而言,还有一个重要环节,即需要进行光学成像质量的检测。只有通过光学成像质量虚拟检测,才能判定全系统的技术性能指标是否达到要求。

2.3 光学成像质量虚拟检测系统的构成

由于在光学设计中,目前仍采用光路追迹方法校正几何像差,采用几何像差评价成像质量。对物镜成像质量进行检测,所得几何像差的测量结果可以直接与光学设计的光路追迹结果进行比较。因此,有必要通过测量各种几何像差的大小和分布来评价成像质量。成像质量虚拟检测系统的构成如图 1 中左下部分流程所示。

以焦面法检测物镜系统的几何像差为例,其虚拟检测系统光路模型如图 8 所示。



- 1. 光源; 2. 聚光镜; 3. 滤光片; 4. 狭缝光阑; 5. 平行光管物镜; 6. 被测物镜; 7. 虚拟测量显微镜; D. 区域光阑;
- (a) 焦前(或焦后)截面 e-e 上 2 组条纹不重合;
- (b) 区域焦点上 2 组条纹完全重合产生的图样

图 8 焦面法虚拟检测系统光路

Fig. 8 Beam path of virtual test system with focal plane method

由于区域光阑上的通光小孔可缩小成一个理想的点,细光束可缩小成一条理想的光线,因此,虚拟测量的精度是现实光学测量手段难以达到的极限。虚拟检测系统可准确快捷地测量物方不同带区的光线对,在像方的带区焦点位置建立坐标,并将实时绘制出的各种像差曲线图显示在屏幕上,便于像差的预测和成像质量的评估。

2.4 光学成像质量虚拟检测系统的仿真检测

2.4.1 光学系统原型几何像差的虚拟检测与仿真

从模型库的几何子模型与误差子模型里提取光学系统的结构参数及其公差值,面形误差与表面粗糙度信息,将它们随机迭加(在相应的结构参数上)构造光学系统虚拟原型,进行几何像差虚拟检测仿真。将检测结果的像差数据存入误差子模型,并与光学系统公差和像差容限比较,评价虚拟制造的成像质量,以完善设计与制造。

2.4.2 通过虚拟检测进行敏度分析仿真

光学系统构造参数各个环节的误差对全系统像质的影响如何,这是敏度分析的课题。在像差虚拟检测时,从左到右按顺序逐面迭加相应的等比率的公差值,进行系统像差检测仿真,实时报告各个环节误差对系统像差贡献的大小,为进一步评价优化设计结果及进一步完善设计与制造提供了准确可靠的依据。例如,对多片结构的光学系统中任何一片非球面透镜的制造质量的控制,传统的方法是难以解决的,而通过像质检测进行敏度分析仿真,这个问题就迎刃而解。

3 结束语

虚拟加工与检测系统将为光学产品超精密制造提供一种全新的方法,使新产品在实际加工之前能够对其可行性进行评估,以节省加工试制原型的成本。利用虚拟制造技术研究超精密切削加工,能够直观地表现加工表面的形成过程,预测加工精度,使得在实际制造中优化加工条件和提高加工质量,并缩短周期,降低制造成本。

成像质量的虚拟检测与敏度分析仿真,能够实时预报待测光学系统的各项几何像差,有效快捷地解决光学系统像质评价问题。这是拓宽超精密光学制造流程中原型制造造成的瓶颈之最佳途径。

虚拟制造中,对虚拟光学系统原型的成像质量检测仿真,可不受实物个例的限制,可将环节不同、误差不等以及误差分布规律各异的信息构成待测原型,进行检测仿真,可从不同角度去研究和完善

设计及制造,既灵活又可靠。

参考文献:

- [1] 李荣彬,李建广,张志辉.虚拟精密加工系统开发研究[J].机械工程,2001,37(6):66-71.
LEE W B, LI Jian-guang, CHEUNG C F. Research on the development of a virtual precision machining system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(6): 66-71. (in Chinese)
- [2] LEE W B, LI J G, CHEUNG C F. Applications of virtual manufacturing in ultra-precision diamond turning [C]. ISAM T'2001 Proceedings of International Symposium of Advanced Manufacturing Technology. Nanjing [s. n.], 2001. 27-34.
- [3] CHEUNG C F, LEE W B. A framework of a virtual machining and inspection system for diamond turning of precision optics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119(1-3): 27-40.
- [4] 邵立,马登哲,严隽琪,等.虚拟制造中仿真技术的应用[J].工业工程与管理,2000,5(4):21-25.
SHAO Li, MA Deng-zhe, YAN Juan-qi, et al. Simulation in virtual manufacturing [J]. Industrial Engineering and Management, 2000, 5(4): 21-25. (in Chinese)
- [5] CHEUNG C F, LEE W B, CHIU W M, et al. The manufacture of high quality aspheric surface for optical products [C]. CIRP International Symposium: Advanced Design and Manufacture in the Global Manufacturing Era. Hong Kong [s. n.], 1997. 37-44.

信息化战场指挥对抗的新走向

指挥对抗是指围绕破坏敌方的指挥和指挥系统,保护己方的指挥和指挥系统免遭破坏而进行的一系列对抗行动的总和。信息化战场上,由于信息技术的发展及其在军事领域里的广泛运用,军队的指挥环境发生了极其深刻的变化,这一变化在推动指挥效能不断提高的同时,亦使指挥对抗更趋激烈,并表现出许多新的特点。

★ 指挥对抗成为相对独立的作战行动

从历史上看,指挥对抗几乎和战争的历史一样悠久。但在以往的战争中,由于技术装备等的限制,指挥对抗主要表现为指挥员在作战过程中采取伪装、欺骗等谋略行动,间接地诱使对方在指挥决策上犯错误。由于对抗的结果主要取决于指挥员的谋略素养,因而,这时的指挥对抗主要表现为指挥员在作战过程中随机性很强的指挥行为。

信息技术的发展使现代军队在战场上直接攻击敌方指挥和指挥系统的能力大大增强,如精确制导武器可以对不同距离上的敌方各级各类指挥机构实施准确的定位攻击;计算机病毒等一系列信息攻击手段的出现,不仅为指挥对抗开辟了信息空间这一新的斗争领域,而且使攻击行动变得更加直接和有效。对抗手段的增多和能力的增强,使得指挥对抗越来越多地表现为交战双方在指挥领域里展开的全方位、全时空的直接较量。这种对抗的全方位性和直接性,客观上要求指挥员必须将指挥对抗作为整个作战行动中的重要组成部分进行单独计划和组织,进而使指挥对抗从过去的指挥行为中摆脱出来,成为指挥员精心组织的、各种作战力量密切协调的、相对独立的作战行动。

★ 指挥对抗将由战中向战前位移

以往战争中,虽然“先胜而后求战”是兵家的普遍追求,但由于战场的盖然性太强,不确定因素太多,因而指挥对抗往往在战中真刀真枪的较量展开后,才能有效实施。

信息化战场上,由于信息技术的发展使得指挥信息流在作战中的主导和控制作用更趋精确、高效,军队指挥实现了实时或近实时,因而,拥有指挥优势的一方,便可在战场上按计划、有组织地实施作战行动;相反,丧失指挥优势的一方将变成“聋子”、“瞎子”,难以有效地组织起作战行动,甚至还可能出现听从敌方“调遣”的被动局面。这一变化客观上要求指挥员在组织实施大规模作战行动前,充分运用各种手段与敌展开全方位的指挥对抗,以瘫痪敌方的指挥和指挥系统,夺取指挥上的优势,从而使指挥对抗开始由战中向战前位移。海湾战争中,以美国为首的多国部队在大规模空中和地面作战行动开始前,便以精确制导炸弹、侦察卫星、预警机、电子战飞机、传感器等多种信息系统和手段,对伊军的指挥控制系统进行了有力打击,并迅速瘫痪了伊军的指挥系统,这就是指挥对抗“前移”的典型例子。

★ 指挥对抗将更加依赖技术装备的支撑

以往战争中,由于受技术手段等的限制,指挥对抗主要依赖于谋略和战术这些主观因素来达成,使之具有了浓厚的“精神”色彩。

信息化战场上,随着以C4ISR为主的指挥控制手段的发展进步,除运用谋略和战术外,交战双方的指挥对抗将更加依赖于技术装备和手段这些物质因素。以电子对抗为例,上世纪80年代以来,电子战便在指挥对抗中首当其冲,并成为贯穿始终的一个重要环节。时至今日,先进的信息技术及手段已成为攻击对方指挥系统的重要武器,从而使指挥对抗显现出更加明显的技术特征。

(春晨 供稿)